



---

# **DIPLOMARBEIT**

---

Herr  
**David Straube**

## **Entwicklung eines Tauchcomputers**

Mittweida, 2013



# **DIPLOMARBEIT**

---

## **Entwicklung eines Tauchcomputers**

Autor:

**Herr David Straube**

Studiengang:

**Informationstechnik, Dipl.-Ing. (FH)**

Seminargruppe:

**KI09wF-D**

Erstprüfer:

**Prof. Dr.-Ing. Thomas Beierlein**

Zweitprüfer:

**Dipl.-Phys. Oliver Rauch**

Einreichung:

**Mittweida, 17.07.2013**

Verteidigung/Bewertung:

**Mittweida, 2013**

# **DIPLOMA THESIS**

---

## **Development of a dive computer**

author:

**Mr. David Straube**

course of studies:

**Informationstechnik, Dipl.-Ing. (FH)**

seminar group:

**KI09wF-D**

first examiner:

**Prof. Dr.-Ing. Thomas Beierlein**

second examiner:

**Dipl.-Phys. Oliver Rauch**

submission:

**Mittweida, 17.07.2013**

defence/ evaluation:

**Mittweida, 2013**



## **Bibliografische Beschreibung:**

Straube, David:

Entwicklung eines Tauchcomputers. - 2013. - VIII, 68, XIII S.

Mittweida, Hochschule Mittweida, Fakultät Elektro- und Informationstechnik, Diplomarbeit, 2013

## **Referat:**

Diese Diplomarbeit befasst sich mit der Entwicklung und der Auslegung der elektronischen Hardware eines Tauchcomputers. Hierfür wird zunächst mittels einer Marktanalyse der Stand der Technik abgebildet. Anschließend erfolgt eine Einführung in die für die Arbeit relevanten technischen Grundlagen. Die Auseinandersetzung mit wesentlichen charakteristischen Kenndaten und Funktionen ermöglicht eine gezielte Bauteilauswahl. Eine Untersuchung zur Leistungsaufnahme zeigt die Realisierbarkeit des Systemkonzepts auf. Weiterführend wird die Umsetzung des aufgestellten Systemkonzepts dargestellt. Ein entwickeltes Betriebssystem für den Tauchcomputer ermöglicht sowohl die experimentelle Untersuchung zur Messabweichung und Funktion der Sensorik als auch die Überprüfung der tatsächlichen Leistungsaufnahme dieser mobilen Applikation.



# Inhalt

|   |             |
|---|-------------|
| <b>Abbildungsverzeichnis.....</b>                                 | <b>IV</b>   |
| <b>Tabellenverzeichnis.....</b>                                   | <b>VII</b>  |
| <b>Abkürzungsverzeichnis.....</b>                                 | <b>VIII</b> |
| <b>1 Einleitung.....</b>  | <b>1</b>    |
| 1.1 <i>Motivation.....</i>  | <i>1</i>    |
| 1.2 <i>Problemstellung und Zielsetzung.....</i>                   | <i>1</i>    |
| 1.3 <i>Kapitelübersicht .....</i>                                 | <i>2</i>    |
| <b>2 Grundlagen und Stand der Technik .....</b>                   | <b>5</b>    |
| 2.1 <i>Marktanalyse.....</i>                                      | <i>5</i>    |
| 2.1.1 Technische Daten von Tauchcomputern .....                   | 6           |
| 2.1.2 Analyse der verwendeten Hardware und Funktionen .....       | 7           |
| 2.2 <i>Druckmessung.....</i>                                      | <i>10</i>   |
| 2.2.1 Definition und Einheiten des Druckes .....                  | 10          |
| 2.2.2 Aufbau von Drucksensoren.....                               | 11          |
| 2.2.3 Temperaturabhängigkeit von Drucksensoren .....              | 13          |
| 2.3 <i>Galvanische Sauerstoffsensoren .....</i>                   | <i>14</i>   |
| 2.3.1 Partialdruckgesetz .....                                    | 14          |
| 2.3.2 Funktionsprinzip von galvanischen Sauerstoffsensoren.....   | 15          |
| 2.3.3 Technische Daten eines galvanischen Sauerstoffsensors ..... | 16          |
| 2.3.4 Kennlinie des Sauerstoffsensors OOD101 .....                | 16          |
| 2.3.5 Zeitliches Verhalten von Sauerstoffsensoren .....           | 18          |
| 2.4 <i>Akkumulatoren .....</i>                                    | <i>18</i>   |
| 2.4.1 Ni-MH-Akkumulator.....                                      | 18          |
| 2.4.2 Li-Ion-Akkumulator.....                                     | 19          |
| 2.5 <i>Displays .....</i>   | <i>21</i>   |
| 2.5.1 TFT/LC-Displays .....                                       | 22          |
| 2.5.2 OLED-Displays .....   | 23          |
| 2.5.3 Charakteristisch Kenndaten von Displays .....               | 24          |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>3</b> | <b>Präzisierung der Systemanforderungen.....</b>                  | <b>27</b> |
| 3.1      | <i>Zieldefinition .....</i>                                       | <i>27</i> |
| 3.2      | <i>Definition der Zielfunktion .....</i>                          | <i>28</i> |
| 3.3      | <i>Definition der Zielparameter.....</i>                          | <i>29</i> |
| <b>4</b> | <b>Systemkonzept.....</b>   | <b>31</b> |
| 4.1      | <i>Bauteil Auswahl.....</i>                                       | <i>31</i> |
| 4.1.1    | <i>Vorstellung des ausgewählten Drucksensors .....</i>            | <i>31</i> |
| 4.1.2    | <i>Vorstellung der ausgewählten RTC .....</i>                     | <i>33</i> |
| 4.1.3    | <i>Vorstellung des ausgewählten Mikrocontrollers.....</i>         | <i>33</i> |
| 4.1.4    | <i>Auswahl des Displays .....</i>                                 | <i>36</i> |
| 4.2      | <i>Untersuchung zum Leistungsbedarf .....</i>                     | <i>37</i> |
| 4.2.1    | <i>Leistungsaufnahme der ausgewählten Komponenten.....</i>        | <i>37</i> |
| 4.2.2    | <i>Leistungsaufnahme von Tauchcomputern .....</i>                 | <i>38</i> |
| 4.2.3    | <i>Bewertung des Leistungsbedarfs.....</i>                        | <i>39</i> |
| 4.3      | <i>Auswahl des Akkumulators.....</i>                              | <i>39</i> |
| 4.4      | <i>Blockschaltplan des Systemkonzepts.....</i>                    | <i>40</i> |
| <b>5</b> | <b>Realisierung des Systemkonzepts.....</b>                       | <b>43</b> |
| 5.1      | <i>Realisierung der Spannungsversorgung.....</i>                  | <i>43</i> |
| 5.2      | <i>Spannungsversorgung des OLED Displays.....</i>                 | <i>45</i> |
| 5.3      | <i>Ladeschaltung und Tiefentladeschutz .....</i>                  | <i>46</i> |
| 5.4      | <i>Realisierung der Messung der Sauerstoffsensoren .....</i>      | <i>47</i> |
| 5.4.1    | <i>Signalaufbereitung der Messung .....</i>                       | <i>48</i> |
| 5.4.2    | <i>Glättung der analogen Versorgungsspannung .....</i>            | <i>50</i> |
| 5.5      | <i>Realisierung des Tauchcomputers .....</i>                      | <i>52</i> |
| <b>6</b> | <b>Systemtest.....</b>  | <b>55</b> |
| 6.1      | <i>Aufbau der Testsoftware.....</i>                               | <i>55</i> |
| 6.1.1    | <i>Oberflächen- / Konfigurationsmodus .....</i>                   | <i>55</i> |
| 6.1.2    | <i>Tauchmodus .....</i>   | <i>57</i> |
| 6.1.3    | <i>Test der USB-Schnittstelle .....</i>                           | <i>57</i> |
| 6.2      | <i>Überprüfung der Drucksensoren.....</i>                         | <i>58</i> |
| 6.3      | <i>Experimentelle Überprüfung der Sauerstoffsensoren.....</i>     | <i>59</i> |
| 6.4      | <i>Messungen zum Energieverbrauch der Schaltung.....</i>          | <i>61</i> |
| 6.4.1    | <i>Messungen zur Stromaufnahme im Betrieb.....</i>                | <i>61</i> |
| 6.4.2    | <i>Messungen zur Ruhestromaufnahme und Tiefentladeschutz.....</i> | <i>62</i> |

---

|   |           |
|---|-----------|
| <b>7 Ergebnisse und Ausblick .....</b>    | <b>65</b> |
| 7.1 Zusammenfassung der Ergebnisse .....  | 65        |
| 7.2 Ausblick.....                         | 67        |
| <b>Literatur ... ..</b>                   | <b>69</b> |
| <b>Anlagen .....</b>                      | <b>73</b> |
| Anlagen, Datenblatt Sauerstoffsensor..... | I         |
| Anlagen, Programmablauf Drucksensor ..... | III       |
| Anlagen, Schaltplan Tauchcomputer.....    | V         |
| Anlagen, Schaltplan O2-Sensor-Board ..... | VII       |
| Anlagen, Layout Tauchcomputer .....       | IX        |
| Anlagen, Layouts Sensorboards .....       | XI        |
| Anlagen, CD.....                          | XIII      |
| <b>Selbstständigkeitserklärung</b>        |           |

# Abbildungsverzeichnis

|  |    |
|--|----|
| Abbildung 1: Differenzdrucksensor und Absolutdrucksensor .....                         | 11 |
| Abbildung 2: Dehnung und Stauchung der Membran und Aufbau eines DMS .....              | 12 |
| Abbildung 3: Messbrücke eines Drucksensors .....                                       | 12 |
| Abbildung 4: Einfluss der Temperatur auf piezoresistive Drucksensoren .....            | 13 |
| Abbildung 5: Technische Daten des Sauerstoffsensors Typ: OOD101 / Firma: Envitec ..    | 16 |
| Abbildung 6: Kennlinie Sauerstoffsensor OOD101 EnviteC - Sauerstoffkonzentration ..... | 17 |
| Abbildung 7: Kennlinie Sauerstoffsensor OOD101 EnviteC - Druck.....                    | 17 |
| Abbildung 8: Ladekennlinien von Ni-MH Akkumulatoren .....                              | 19 |
| Abbildung 9: Energiedichten verschiedener Akkumulator-Technologien .....               | 20 |
| Abbildung 10: Kerndaten Li-Ion-Akkumulator UR14500P .....                              | 20 |
| Abbildung 11: Ladekennlinie Li-Ion Akkumulator UR14500P .....                          | 21 |
| Abbildung 12: Aufbau eines TFT/LC-Displays .....                                       | 22 |
| Abbildung 13: Schematischer Aufbau einer Mehrschicht-OLED .....                        | 23 |
| Abbildung 14: Technische Daten MS5803-30BA .....                                       | 32 |
| Abbildung 15: Blockschaltplan Drucksensor MS5803-30BA .....                            | 32 |
| Abbildung 16: Technische Daten Atmel ATxmega192a3 .....                                | 34 |
| Abbildung 17: Stromaufnahme ATxmega .....  | 35 |
| Abbildung 18: Taktsystem ATxmega .....   | 35 |
| Abbildung 19: Blockschaltplan des Systemkonzepts.....                                  | 41 |
| Abbildung 20: Aufbau Schaltregler - LTC3440 .....                                      | 44 |

|   |    |
|---|----|
| Abbildungsverzeichnis   | V  |
| Abbildung 21 Kennlinie Wirkungsgrad - LTC3440 .....                       | 44 |
| Abbildung 22: Aufbau Spannungsversorgung Display – LT3471 .....           | 45 |
| Abbildung 23: Li-Ion Ladegerät - LTC4054 .....                            | 46 |
| Abbildung 24: Ladezyklus - LTC4054 .....                                  | 47 |
| Abbildung 25: Messschaltung Sauerstoffmessung .....                       | 48 |
| Abbildung 26: Aussteuerung des Messbereichs .....                         | 49 |
| Abbildung 27: Amplitudengang Tiefpassfilter 1. Ordnung .....              | 50 |
| Abbildung 28: Zeitverhalten Tiefpass 1. Ordnung .....                     | 50 |
| Abbildung 29: System - Tiefpass 2. Ordnung .....                          | 51 |
| Abbildung 30: Amplitudengang Tiefpassfilter 2. Ordnung .....              | 52 |
| Abbildung 31: Platine des Tauchcomputers .....                            | 53 |
| Abbildung 32: Oberflächen- / Konfigurationsmodus des Tauchcomputers ..... | 55 |
| Abbildung 33: Konfigurationsmenü im Oberflächenmodus .....                | 56 |
| Abbildung 34: Tauchmodus des Tauchcomputers .....                         | 57 |
| Abbildung 35: Druckkammer .....   | 59 |
| Abbildung 36: Simulation Sauerstoffsensor .....                           | 59 |
| Abbildung 37: Messabweichungen durch Auflösungsfehler .....               | 60 |
| Abbildung 38: Kennlinie galvanischer Sauerstoffsensor .....               | 61 |
| Abbildung 39: Leistungsaufnahme des Tauchcomputer .....                   | 62 |
| Abbildung 40: Stromaufnahme - Power-down mode .....                       | 63 |
| Abbildung 41: Ausgangsspannung des Schaltregler nach Abschaltung .....    | 63 |
| Abbildung 42: Abschaltung Schaltregler .....                              | 64 |





## Tabellenverzeichnis

|   |    |
|---|----|
| Tabelle 1: Tauchcomputer - Technische Daten .....                           | 6  |
| Tabelle 2: Vergleich Displaytechnologien anhand technischer Daten .....     | 36 |
| Tabelle 3: Leistungsaufnahme ausgewählter Komponenten .....                 | 38 |
| Tabelle 4: Laufzeit Leistungsaufnahme von Tauchcomputern .....              | 38 |
| Tabelle 5: Gegenüberstellung von Akkumulatoren zur Laufzeitbestimmung ..... | 40 |
| Tabelle 6: Versorgungsspannungsbereiche eingesetzter Hardware .....         | 43 |
| Tabelle 7: Temperaturmessung des Drucksensors .....                         | 58 |

## Abkürzungsverzeichnis

|                       |  |
|-----------------------|--|
| <b>CC/CV</b>          | <b>Constant-Current/Constant-Voltage</b>                           |
| <b>CPU</b>            | <b>Central Processing Unit</b>                                     |
| <b>DMS</b>            | <b>Dehnungs</b> messstreifen                                       |
| <b>HUD</b>            | <b>Head Up Display</b>   |
| <b>IC</b>             | <b>Integrated Circuit</b>  |
| <b>I<sup>2</sup>C</b> | <b>Inter-Integrated Circuit</b>                                    |
| <b>LCD</b>            | <b>Liquid-Crystal Display</b>                                      |
| <b>LED</b>            | <b>Light-Emitting Diode</b>  |
| <b>Li-Ion</b>         | <b>Lithium-Ionen</b>   |
| <b>Ni-MH</b>          | <b>Nickel Metallhydrid</b>   |
| <b>OLED</b>           | <b>Organic Light-Emitting Diode</b>                                |
| <b>PC</b>             | <b>Personal Computer</b>   |
| <b>PGA</b>            | <b>Programmable Gain Amplifier</b>                                 |
| <b>PLL</b>            | <b>Phase-Locked Loop</b>   |
| <b>PROM</b>           | <b>Programmable Read Only Memory</b>                               |
| <b>RTC</b>            | <b>Real Time Clock</b>   |
| <b>SI</b>             | <b>Système International d'unités</b>                              |
| <b>SPI</b>            | <b>Serial Peripheral Interface</b>                                 |
| <b>TFT</b>            | <b>Thin-Film-Transistor</b>  |
| <b>USART</b>          | <b>Universal Synchronous and Asynchronous Receiver Transmitter</b> |
| <b>USB</b>            | <b>Universal Serial Bus</b>  |

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Tauchen erfreut sich zunehmender Beliebtheit und hat sich als feste Größe im Sport und Hobbybereich etabliert. Beim Tauchen kommen verschiedene Tauchgeräte zum Einsatz. Presslufttauchgeräte bieten durch ihren einfachen technischen Aufbau und durch die konstante Gaszusammensetzung des Einatemgases eine recht sichere Tauchausrüstung für den Sport- und Hobbybereich.

Beim professionellen Sporttauchen kommen heutzutage verstärkt auch Kreislauftauchgeräte zum Einsatz. Hierbei wird, anders als bei Presslufttauchgeräten, die ausgeatmete Luft in das Kreislauftauchgerät zurückgeführt und nach erfolgter Aufbereitung wieder eingeatmet. In einem Absorber wird das Kohlenstoffdioxid in einem chemischen Prozess herausgefiltert. Durch eine geregelte Zufuhr von frischem Gas wird der verbrauchte Sauerstoffanteil im Atemgas kontinuierlich ersetzt.

Der Vorteil dieser Technik besteht in der effizienten Nutzung des Atemgases und der damit verbundenen Gewichtsreduzierung der Tauchausrüstung. Zudem macht die reduzierte bzw. ausbleibende Blasenbildung die Technik sehr beliebt. Weitere Vorteile sind eine geringere Dehydration und ein geringeres Auskühlen durch warmes und feuchtes Einatemgas.

Neben der oben beschriebenen Tauchausrüstung stellen heutzutage Tauchcomputer einen weiteren nicht mehr wegzudenkenden Ausrüstungsgegenstand dar. Diese ermöglichen durch die Messung und Anzeige der Tauchtiefe und Tauchzeit einen sicheren Dekompressionsaufstieg. Zudem bieten einige Tauchcomputer durch die Messung des Sauerstoffpartialdruckes über extern angeschlossene Sauerstoffsensoren im Atemgas eine Überwachung der korrekten Regelung des Kreislauftauchgerätes. Damit machen Tauchcomputer den durchaus schönen, aber auch gefährlichen Tauchsport sicherer.

## 1.2 Problemstellung und Zielsetzung

Tauchcomputer, die für eine Einsatztiefe in 180 m Tiefe geeignet sind und zudem eine Überwachung des Sauerstoffpartialdruckes im Kreislauftauchgerät bieten, sind nur in begrenzter Auswahl auf dem Markt erhältlich und zudem recht teuer. Um eine Alternative zum Kauf eines solchen teuren Gerätes zu bieten, soll in einem Gemeinschaftsprojekt von mehreren Sporttauchern eine kleine Serie von Tauchcomputern für den privaten Gebrauch aufgebaut werden.

Ein weiteres Ziel, das dieses Projekt verfolgt, ist die individuelle Gestaltungsmöglichkeit der Anzeige als auch der Funktionen des Tauchcomputers. Damit soll der Tauchcomputer auf die Bedürfnisse des jeweiligen Tauchers eingehen und Entwicklungsspielraum für eigene Ideen zulassen.

Diese Diplomarbeit befasst sich daher mit der Auslegung und Entwicklung der elektronischen Hardware eines Tauchcomputers, der ein Tauchen in 180 m Tiefe und die Überwachung des Sauerstoffpartialdruckes im Kreislaufgerät ermöglichen soll. Ferner ist die Entwicklung eines Betriebssystems zum Test und Nachweis der Grundfunktionen dieser mobilen Applikation Bestandteil dieser Arbeit.

## **1.3 Kapitelübersicht**

Die vorliegende Diplomarbeit umfasst insgesamt sieben Kapitel. Nachdem einleitend die Problemstellung geschildert sowie die Zielsetzung erläutert wurde, gibt dieser Abschnitt eine inhaltliche Übersicht über die weiteren Kapitel dieser Diplomarbeit:

### **Kapitel 2 - Grundlagen und Stand der Technik**

Das zweite Kapitel beginnt mit einer Marktanalyse und zeigt damit den Stand der Technik auf. Die Tauchcomputer werden anhand ihrer technischen Daten, der Funktionalität und der verwendeten Hardware gegenübergestellt betrachtet. Weiterführend beschäftigt sich dieses Kapitel mit den Grundlagen. Es erläutert die Funktion und wesentlichen Eigenschaften von piezoresistiven Drucksensoren und galvanischen Sauerstoffsensoren. Darüber hinaus stellt dieses Kapitel vergleichend zwei Akkumulatoren- und Display-Technologien anhand ihrer charakteristischen Kenndaten gegenüber. Dieses Kapitel bildet damit die Grundlage zur Aufstellung eines Systemkonzepts in Kapitel 4.

### **Kapitel 3 - Präzisierung der Systemanforderungen**

In diesem Kapitel werden die Systemanforderungen präzisiert. Zunächst werden die grundlegenden Anforderungen an die Schaltung bzw. das System definiert. Anschließend werden die Funktionen, die der Tauchcomputer bereitstellen soll, erörtert. Darüber hinaus werden die Zielparameter festgelegt. Diese festgesetzten Zielparameter erlauben im abschließenden Kapitel „Ergebnisse und Ausblick“ eine Bewertung dieser Arbeit.

### **Kapitel 4 – Systemkonzept:**

Das vierte Kapitel erläutert zunächst die Auswahl der Bauteile. Zudem stellt es zwei Displays unterschiedlicher Technologien anhand der relevanten technischen Daten gegenüber und bewertet diese. Anschließend erfolgt eine Untersuchung zur Leistungsaufnahme der ausgewählten Komponenten. Diese wird anhand der Angaben von Laufzeit und der eingesetzten Batterien, der in der Marktanalyse betrachteten Tauchcomputer auf die Realisierbarkeit untersucht und bewertet. Die Untersuchung stellt auch die Grundlage zur

Auswahl eines Akkumulators dar. Abschließend wird der systematische Aufbau des Systemkonzepts in einem Blockschaltplan dargestellt und erläutert.

### **Kapitel 5 – Realisierung des Systemkonzepts**

Das Kapitel 5 fokussiert die Umsetzung des im Kapitel 4 vorgestellten Systemkonzepts. Es zeigt sowohl die Realisierung der Ladeschaltung des Akkumulators und des Tiefentladeschutzes als auch die Umsetzung der Spannungsversorgung auf. Weiterführend befasst sich Kapitel 5 mit dem Aufbau des Messsystems für die galvanischen Sauerstoffsensoren.

### **Kapitel 6 - Systemtest**

In Kapitel 6 wird zunächst die entwickelte Software erläutert. Sie umfasst die in Kapitel 3 gewünschten Grundfunktionalitäten und ermöglicht damit einen Systemtest. Mithilfe dieser Software können Untersuchungen zur Laufzeit und zur Leistungsaufnahme sowohl im Betrieb als auch im Standby-Modus durchgeführt werden. Des Weiteren erlaubt diese die experimentelle Überprüfung der angeschlossenen Druck- und Sauerstoffsensoren. Auch die Messgenauigkeit für verschieden gealterte Sauerstoffsensoren kann mithilfe des Testsystems bestimmt werden. Die Ergebnisse dieses Systemtests stellen damit im Wesentlichen die Grundlage für die Bewertung der Ergebnisse dieser Arbeit dar, die im abschließenden Kapitel erfolgt.

### **Kapital 7 - Ergebnisse und Ausblick**

Dieses abschließende Kapitel fasst die Arbeit und die Ergebnisse des umgesetzten Projektes zusammen. Es umfasst zudem eine Bewertung der Ergebnisse dieser Arbeit anhand der gestellten Systemanforderungen, die im Kapitel 3 aufgeführt wurden. Der Ausblick zeigt weitere geplante Funktionen auf, die in den Tauchcomputer zukünftig integriert werden sollen. Darüber hinaus werden weitere geplante Einsatzmöglichkeiten für die entwickelte mobile Plattform des Tauchcomputers angeführt.



## 2 Grundlagen und Stand der Technik

Dieses Kapitel beginnt mit einer Marktanalyse von Tauchcomputern, um den Stand der Technik abzubilden. Zu diesem Zweck werden die Tauchcomputer vergleichend anhand ihrer Funktionen und der eingesetzten Hardware betrachtet. Anschließend beschäftigt sich dieses Kapitel mit den Grundlagen. Es erläutert die Funktion und wesentlichen Eigenschaften von piezoresistiven Drucksensoren und galvanischen Sauerstoffsensoren. Darüber hinaus werden vergleichend zwei Akkumulatoren- und Display-Technologien anhand ihrer wesentlichen charakteristischen Kenndaten gegenübergestellt. Damit kann auf der Grundlage dieses Kapitels ein Systemkonzept für die Entwicklung des Tauchcomputers aufgestellt werden.

### 2.1 Marktanalyse

Der derzeitige Markt bietet Tauchcomputer in einem breiten Spektrum, in diversen Preiskategorien und mit unterschiedlicher Funktionalität. Im Folgenden sollen Tauchcomputer der Hersteller „Heinrichs & Weikamp“ und „Shearwater Research Inc.“ anhand der technischen Daten betrachtet werden. Diese Tauchcomputer sind im oberen Preissegment angesiedelt und bieten eine Vielzahl an Funktionen. Neben der Anzeige wichtiger Daten während des Tauchganges bieten diese ferner Möglichkeiten der Planung und der Simulation von Tauchgängen. Des Weiteren erlauben sie eine Analyse durchgeführter Tauchgänge direkt über das Gerät oder über die Kopplung des Gerätes mit einem Computer.

Die nachfolgende Betrachtung beschränkt sich auf Tauchcomputer, die die Möglichkeit einer Überwachung des Sauerstoffpartialdruckes über extern angeschlossene galvanische Sauerstoffsensoren ermöglichen. Darüber hinaus gibt es Tauchcomputer, die nur eine Anzeige des Sauerstoffpartialdruckes über eine Berechnung anhand des gemessenen Druckes und dem vorab eingestellten Atemgas bieten. Diese sind allerdings für die Ziele dieser Diplomarbeit nicht relevant und werden aus diesem Grund nicht berücksichtigt.

Der folgende Abschnitt 2.1.1 stellt zunächst die technischen Daten der angebotenen Tauchcomputer beider Hersteller in einer Tabelle zusammen. Die verbauten Hardwarekomponenten, die technischen Daten, Funktionen sowie der Verkaufspreis werden weiterführend im Abschnitt 2.1.2 detaillierter analysiert.

## 2.1.1 Technische Daten von Tauchcomputern

Im Folgenden sind die technischen Daten der Tauchcomputer von „Heinrichs & Weikamp“ und „Shearwater Research Inc.“ vergleichend aufgelistet, wie sie in den Internetauftritten beider Firmen zu finden sind:

|  | <b>Petrel OC/CC EXT</b><br>Shearwater Research Inc.  | <b>Predator OC/CC EXT</b><br>Shearwater Research Inc.   | <b>OSTC 3</b><br>Heinrichs & Weikamp   | <b>DR<sub>5</sub></b><br>Heinrichs & Weikamp   |
|--|--|---|--|--|
| <b>Anzeigen:</b>                         | 2,4" , Full Color LC-Display mit Helligkeitssensor<br><br>Auflösung: 320 x 240 Pixel<br>Farbauflösung: 65k<br>3 Stufenregelung automatisch oder fixe Displayhelligkeit                                 | 2,4", Full-Color OLED Display mit Helligkeitssensor<br><br>Auflösung: 320 x 240 Pixel<br>Farbauflösung: 65k<br>3 Stufenregelung automatisch oder fixe Displayhelligkeit                               | 2,0" IPS LC-Display mit Umgebungslichtsensor<br><br>Blickwinkel: 160 °<br>Auflösung: 320 x 240 Pixel<br>Farbauflösung: 65 k  | 2,4" OLED-Display mit Umgebungslichtsensor<br><br>Blickwinkel: 160 °<br>Auflösung: 320 x 240 Pixel<br>Farbauflösung: 65 k  |
| <b>Bedienung:</b>                        | 2 Piezo-Taster   | 2 Piezo-Taster  | 2 Druck-Taster   | 3 Piezo-Taster   |
| <b>Drucksensor:</b>                      | Piezoresistiver Drucksensor<br><br>• Messbereich: 0 - 14 bar<br>• Genauigkeit: ± 20 mbar (bei 1013 mbar)<br>±100 mBar (bei 14 bar)   | Piezoresistiver Drucksensor<br><br>• Messbereich: 0-14 bar<br>• Genauigkeit: ± 20 mBar (bei 1013 mbar)<br>±100 mBar (bei 14 bar)  | Piezoresistiver Drucksensor:<br><br>Druck:<br>• Messbereich: 0 -14 bar abs.<br>• Auflösung: 1,2 mbar<br><br>Temperatur:<br>• Auflösung: 0.1 °C /<br>• Genauigkeit: ± 1 °C<br>Sensor : Intersema MS5541C                                    | Piezoresistiver Drucksensor:<br><br>Druck:<br>• Messbereich: 0- 30 bar abs.<br>• Auflösung: 0.5 mBar<br><br>Temperatur:<br>• Auflösung 0.1 °C /<br>• Genauigkeit: ± 0.5 °C                                   |
| <b>Einsatztiefe:</b>                     | 140 m  | 140 m   | 120 m  | 200 m  |
| <b>Sauerstoff-überwachung:</b>           | Bis zu 3 galvanischen Sauerstoffsensoren<br><br>Input Range: 0 – 100 mV<br>O <sub>2</sub> -Sensor: typ. 10 mV in ambient air<br>Kalibrierung bei : 98 % O <sub>2</sub><br>Anschluss: Fischer connector | Bis zu 3 galvanischen Sauerstoffsensoren<br><br>Input Range: 0 – 100 mV<br>O <sub>2</sub> -Sensor: typ. 10 mV in ambient air<br>Kalibrierung bei : 98% O <sub>2</sub><br>Anschluss: Fischer connector | Bis zu 3 galvanischen Sauerstoffsensoren<br><br>Kalibrierung bei : 98 % O <sub>2</sub><br>Anschluss: Digital via optischem Port (Nassstecksystem LWL)<br>* Überwachung der O <sub>2</sub> -Sensoren nur mit HUD (Head-Up Display) möglich. | Bis zu 3 galvanischen Sauerstoffsensoren<br><br>Input Range: 2 – 160 mV<br>O <sub>2</sub> -Sensor: typ. 10 mV in ambient air<br>Kalibrierung bei: 98 % & 21 % O <sub>2</sub><br>Anschluss: Fischer connector |
| <b>Schnittstellen:</b>                   | Bluetooth  | Bluetooth   | USB  | USB  |
| <b>Strom-versorgung:</b>                 | Single Battery jeglicher Art<br>Size: AA<br>0,8 V bis 4,3 V  | Single Battery<br>Size: AA<br>Saft LS 14500 3,6 V   | Single Battery jeglicher Art<br>Size: AA   | Li-Ion-Akkumulator, aufladbar via USB  |
| <b>Laufzeit:</b>                         | • Alkaline 1,5 V: 34 Std<br>• Saft LS14500 3,6 V: 90 Std<br>• Li-Ion 3,7 V: 34 Std<br>• NiMH 1,2 V: 30 Std<br>• Photo Lithium 1,5 V: 55 Std<br>* mittlere Displayhelligkeit                            | Saft LS 14500 3,6 V: 90 Std (Kapazität 2600 mAh)<br><br>* mittlere Displayhelligkeit  | • Alkaline 1,5 V: 30 Std<br>• Saft LS14500 3,6 V: 60 Std<br>• Photo Lithium 1,5 V: 40 Std<br><br>• Standby: 2 Jahre  | • Betrieb: 20 Std<br>• Standby: 2 Jahre  |
| <b>Datenspeicher:</b>                    | Speicher für 1000 Std  | Speicher für 20 Std   | 4 MByte Flash EEPROM   | 2 GByte Flash-EEPROM   |
| <b>Maße:</b>                             | 84 mm x 74 mm x 38 mm  | 83 mm x 73 mm x 38 mm   | 64 mm x 62 mm x 22 mm  | 80 mm x 66 mm x 29 mm  |
| <b>Gewicht:</b>                          | 258 g  | 358 g   | 160 g  | 250 g  |
| <b>Preis inkl. MwSt: (Stand 06/2013)</b> | 1285,- €   | 1575,- €  | 785,- €<br>HUD 555,- €   | 1385,- €   |

**Tabelle 1: Tauchcomputer - Technische Daten**<sup>1 2</sup>

<sup>1</sup> vgl. [1] Heinrichs und Weikamp (2013), OSTC 3 und DR<sub>5</sub>.

<sup>2</sup> vgl. [2] Shearwater Research Inc. (2013), Petrel OC/CC EXT und Predator OC/CC EXT.



### **2.1.2 Analyse der verwendeten Hardware und Funktionen**

Die im vorangegangenen Abschnitt 2.1.1 tabellarisch dargestellten technischen Daten werden in diesem Abschnitt analysiert. Die Betrachtung erfolgt anhand der eingesetzten Hardwarekomponenten und der Funktionen, die diese Tauchcomputer bieten.

#### ***Display***

Beide Hersteller bieten jeweils Varianten mit einem TFT/LC-Display oder mit einem OLED-Display an. Die Displaygröße der Tauchcomputer reicht von 2,0“ bis 2,4“. Laut Herstellerangaben beträgt die Auflösung 320 x 240 Pixel. Alle Displays besitzen zudem 65535 Farben.

Die Helligkeit der Anzeige kann über Taster manuell in drei Stufen reguliert werden. Ein Umgebungslichtsensor ermöglicht zudem eine automatische Regelung. Diese dient dazu den Stromverbrauch möglichst gering zu halten, um damit eine längere Laufzeit des Tauchcomputers zu erzielen.

#### ***Bedienelemente***

Aufgrund des vorherrschenden Druckes beim Tauchen werden in den Tauchcomputern piezoelektrische Taster eingesetzt. Über diese Taster können die Tauchcomputer konfiguriert bzw. bedient werden.

#### ***Spannungsversorgung und Laufzeit***

Die Spannungsversorgung ist bei den Tauchcomputern unterschiedlich ausgeführt. Die Tauchcomputer Petrel und OSTC 3 bieten einen universalen Betrieb über Batterien und Akkumulatoren an. Hohe Eingangsspannungsbereiche ermöglichen den Einsatz von Batterien und Akkumulatoren der Größe AA jeglicher Art. Allerdings fehlt diesen beiden Tauchcomputern die Option zum Aufladen von Akkumulatoren.

Der Tauchcomputer Predator bietet nur den Betrieb über eine Lithium Batterie an. Diese Batterie besitzt sowohl eine hohe Kapazität von 2600 mAh als auch eine hohe Nennspannung von 3,6 V. Damit garantiert der Tauchcomputer eine Laufzeit von 90 Stunden.

Im Gegensatz dazu wird der Tauchcomputer DR5 von Heinrichs und Weikamp über einen Li-Ion-Akkumulator versorgt. Eine USB-Schnittstelle ermöglicht neben der Datenübertragung auch das Aufladen des Akkumulators. Laut Herstellerangaben dauert der Ladevorgang bis zu 6 Stunden.

Die Laufzeit der Tauchcomputer ist stark von der verwendeten Batterie oder dem Akkumulator abhängig. Sie beträgt je nach Batterie bzw. Akkumulator 20 bis 90 Stunden. Die Angaben zur Laufzeit der Tauchcomputer von Shearwater Research Inc. beziehen sich auf eine gedimmte Displayhelligkeit der mittleren Stufe.

### ***Schnittstellen zur Kommunikation mit dem Computer***

Alle vier Tauchcomputer bieten die Möglichkeit zur Kommunikation mit dem PC. Hierfür sind diese entweder mit einer USB-Schnittstelle oder einer Bluetooth-Schnittstelle ausgestattet. Über die Schnittstelle lassen sich die gespeicherten Daten von durchgeführten Tauchgängen auslesen. Diese können zur Analyse grafisch auf dem PC dargestellt werden. Zudem dient die Schnittstelle dazu Firmware Updates auf den Tauchcomputer zu übertragen oder diesen zu konfigurieren.

### ***Überwachung des Sauerstoffpartialdrucks***

Die Überwachung des Sauerstoffpartialdrucks ist ebenfalls recht unterschiedlich ausgeführt. So erlauben die Tauchcomputer von Shearwater Research Inc. einen direkten Anschluss von bis zu drei galvanischen Sauerstoffsensoren. Der Messbereich ist mit 0 - 100 mV angegeben. Das Kalibrieren erfolgt über eine 1-Punkt-Kalibrierung unter 100 % reinem Sauerstoff.

Der Tauchcomputer OSTC 3 von Heinrichs und Weikamp verwendet für die Überwachung des Sauerstoffpartialdruckes eine zusätzliche Komponente, das sogenannte HUD (Head-Up Display), bestehend aus einer Messeinrichtung und einer Anzeige. Die Anzeige des Sauerstoffpartialdrucks erfolgt über das Display des Tauchcomputers und über Ausgabe am HUD durch verschiedenfarbige Blinkcodes mit einer LED für jeden der drei galvanischen Sauerstoffsensoren. Die Kalibrierung der Sensorik erfolgt über die Messeinrichtung des HUD, ebenfalls unter 100 % reinem Sauerstoff. Die Schnittstelle zwischen der Messeinrichtung und dem Tauchcomputer ist optisch digital ausgeführt. Die Versorgung des HUD erfolgt über eine separate Batterie. Das HUD muss zusätzlich zum Tauchcomputer erworben werden, um eine Überwachung des Sauerstoffpartialdruckes zu realisieren.

Wie die Tauchcomputer von Shearwater Research Inc. erlaubt der Tauchcomputer DR5 von Heinrichs und Weikamp eine direkte Überwachung von bis zu drei Sauerstoffsensoren. Der Messbereich beträgt hier 2 mV bis 160 mV. Das Kalibrieren der Sauerstoffsensoren kann wahlweise über eine 1-Punkt-Kalibrierung oder über eine genauere 2-Punkt Kalibrierung durchgeführt werden. Letztere erfolgt bei atmosphärischer Luft und 100 % reinem Sauerstoff. Hingegen wird die 1-Punkt-Kalibrierung nur unter 100 % reinem Sauerstoff realisiert.

### ***Drucksensoren und Tauchtiefe***

Zur Druckmessung werden piezoresistive Drucksensoren eingesetzt. Die Tauchcomputer von Shearwater Research Inc. sind bis zu einer Tauchtiefe von 140 m einsetzbar. Die Genauigkeit des Sensortyps ist unter atmosphärischen Druck mit  $\pm 20$  mbar angegeben. Unter einem Druck von 14 bar, was einer Tauchtiefe von 130 m entspricht, ist die Genauigkeit mit  $\pm 100$  mbar noch ausreichend genau. Hier entspricht die Messabweichung  $\pm 1$  m.

Die Einsatztiefe des OSTC 3 von Heinrichs und Weikamp ist mit maximal 120 m angegeben. Mit 1,2 mbar ist die Auflösung des Sensortyps sehr genau. Eine Temperaturmessung im Drucksensor, die eine Auflösung von 0,1 °C besitzt, ermöglicht die Temperaturkompensation der Druckmessung. Laut Hersteller beträgt die Genauigkeit  $\pm 1$  °C. Aus dem Datenblatt des verwendeten Drucksensors MS5541C geht hervor, dass dieser über eine digitale SPI-Schnittstelle an den Mikrocontroller angeschlossen ist.

Als einziger der angeführten Tauchcomputer erfüllt der DR5 die Bedingungen für einen Tauchgang bis zu einer Tiefe von 200 m. Da die Auflösung der Druckmessung 0,5 mbar beträgt, kann er eine hochpräzise Tiefenmessung durchführen. Eine Angabe zur Genauigkeit der Messung liegt hier aber nicht vor. Wie der OSTC 3 verfügt auch dieser Sensor über eine Temperaturmessung. Seine Auflösung beträgt 0,1 °C. Die Genauigkeit ist mit  $\pm 0,5$  °C angegeben.

### **Funktionen**

Die wesentliche Funktion des Tauchcomputers besteht in der Anzeige der für den Taucher wichtigen Daten:

- maximale erreichte Tauchtiefe
- aktuelle Tauchtiefe
- Sauerstoffpartialdruck
- Tauchzeit
- Zeit bis zur Wasseroberfläche
- gewähltes Atemgas
- Wassertemperatur und
- Dauer und Tiefe der Dekompressionsstopps.

Darüber hinaus bieten die Tauchcomputer eine Überwachung von fest definierten bzw. vom Bediener eingestellten Grenzwerten. Ein Über- bzw. Unterschreiten der Grenzwerte wird entweder blinkend oder farbig auf dem Display oder über LEDs ausgegeben.

Zu den wesentlichen Funktionen der vorgestellten Tauchcomputer gehört außerdem die Dekompressionssteuerung. Hierfür errechnen diese aus der Tauchzeit und Tauchtiefe sowie aus dem verwendeten Atemgas die Dauer der durchzuführenden Dekompressionsstopps in den entsprechenden Wassertiefen.

Alle Tauchcomputer ermöglichen ein Aufzeichnen der Tauchgänge. Damit lässt sich eine spätere Auswertung des Tauchganges sowohl direkt am Gerät als auch am Computer durchführen. Dazu werden Datum und Uhrzeit sowie Sauerstoffpartialdruck, Temperatur und Tauchtiefe aufgezeichnet. Neben diesen Daten werden zudem die verwendeten Atemgase hinterlegt.

### **Verkaufspreis**

Zusätzlich zu den bereits analysierten Daten listet die Tabelle 1 im Abschnitt 2.1.1 den Verkaufspreis des jeweiligen Tauchcomputers auf. Dabei stellt der Tauchcomputer Pretel mit 1285,- € den günstigsten Tauchcomputer dar. Für den Tauchcomputer OSTC 3 ist zusätzlich das HUD separat zu erwerben, um eine Überwachung des Sauerstoffpartialdruck möglich zu machen. Beide Komponenten sind für einen Gesamtpreis von 1340,- € erhältlich. Der Predator ist mit 1575,- € der Teuerste der vier betrachteten Tauchcomputer. Die Preise beziehen sich auf einen Stand von 06/2013 (inkl. MwSt).

## **2.2 Druckmessung**

In diesem Abschnitt wird zunächst der Grundbegriff Druck definiert. Anschließend soll der Aufbau sowie die Funktion piezoresistiven Drucksensoren erläutert werden. Darüber hinaus wird speziell auf die Temperaturabhängigkeit dieser Drucksensoren eingegangen.

### **2.2.1 Definition und Einheiten des Druckes**

#### **Definition des Druckes**

Die allgemeine Definition von Druck lautet wie folgt: Greift senkrecht zu einer Fläche eine auf die Fläche verteilte Kraft  $F$  an, dann bezeichnet man den Quotienten der Kraft  $F$  zur Fläche  $A$  als Druck  $p$ :<sup>3</sup>

$$p = \frac{F}{A}$$

#### **Einheiten des Druckes**

Die SI-Einheit für Druck ist *Pascal (Pa)*. Darüber hinaus ist im europäischen Raum die Einheit *bar* gebräuchlich. Die Einheit *bar* ist eine gesetzlich zugelassene Einheit für den Druck und darf daher neben der SI-Einheit *Pascal (Pa)* verwendet werden. Es gilt der nachfolgende Zusammenhang:<sup>4</sup>

$$1 \text{ Pascal} = \frac{1 \text{ Newton}}{1 \text{ Quadratmeter}}; \quad 1 \text{ Pa} = \frac{1 \text{ N}}{1 \text{ m}^2} = 10^{-5} \text{ bar}$$

---

<sup>3</sup> vgl. [3] Gaßmann, E. & Gries, A. (2009), Elektronische Druckmesstechnik, Seite 6.

<sup>4</sup> vgl. [4] PTB (2012), Die gesetzlichen Einheiten in Deutschland, Seite 10 f.

### Druck und Wassertiefe

Für die Tiefenmessung des Tauchcomputers ist das Verhältnis von Wassertiefe zum Druck entscheidend. Hier gilt der folgende Zusammenhang:<sup>5</sup>

$$1 \text{ cm } H_2O = 98,1 \text{ Pa} = 0,981 \text{ mbar}^6$$

### 2.2.2 Aufbau von Drucksensoren

Drucksensoren besitzen eine Membran. Auf dieser ist eine Messbrücke aus Dehnungsmessstreifen appliziert. Der einwirkende Druck bewirkt eine Biegung der Membran, welche durch den Drucksensor registriert wird. Bei Biegung, Druck oder Zug verändern sich die Widerstände des Dehnungsmessstreifen aufgrund des piezoresistiven Effekts. Heutzutage werden im Silizium implementierte Widerstände verwendet. Hierbei dient das Silizium-Substrat gleichzeitig als Membran. Der Vorteil besteht in der kostengünstigen Herstellung. Zudem besitzen diese Silizium-Sensoren im Gegensatz zu Sensoren, die aus anderen Materialien gefertigt werden, eine um mehr als den Faktor 10 höhere Empfindlichkeit. Nachteil bei Silizium-Sensoren ist jedoch ein hoher Temperaturkoeffizient.

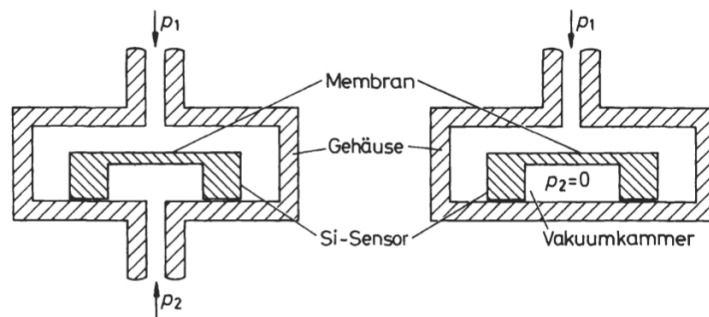


Abbildung 1: Differenzdrucksensor und Absolutdrucksensor<sup>7</sup>

In Abbildung 1 ist der Aufbau zweier Drucksensortypen schematisch dargestellt. Die linke Darstellung zeigt den Aufbau eines Differenzdrucksensors. Auf der oberen Seite wirkt der Druck  $p_1$  auf die Membran und auf der Unterseite der Membran herrscht der Druck  $p_2$ . Für die Auslenkung der Membran ist nur der Differenzdruck  $p_2 - p_1$  maßgebend.

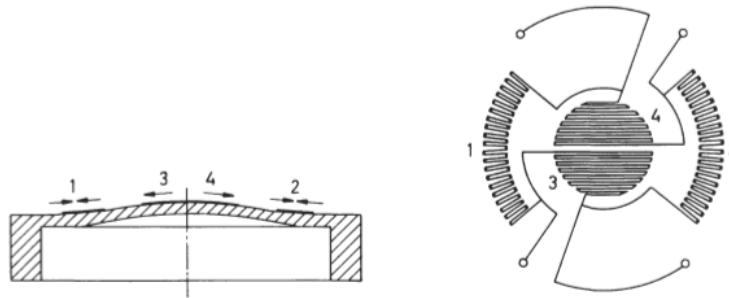
Die rechte Seite der Abbildung zeigt den Aufbau eines Absolutdrucksensors. Hierbei wird eine Seite der Membran als Vakuum-Kammer ausgebildet. Somit ist ausschließlich der Druck  $p_1$  maßgebend. Jedoch stellt die Aufrechterhaltung des Vakuums in der Kammer für

<sup>5</sup> vgl. [5] Tietze, U. & Schenk, Ch. (1999) Halbleiter-Schaltungstechnik, Seite 1241.

<sup>6</sup> abhängig von der geografischen Lage / Höhe; Bezug: Erdbeschleunigung  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$

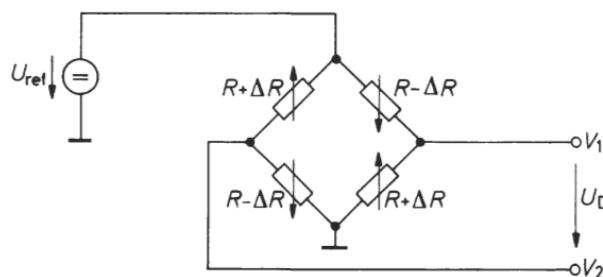
<sup>7</sup> [5] Tietze, U. & Schenk, Ch. (1999) Halbleiter-Schaltungstechnik, Seite 1242.

den Absolutdrucksensor ein Problem dar. Dies wirkt sich negativ auf die Langzeitstabilität des Drucksensors aus.



**Abbildung 2: Dehnung und Stauchung der Membran und Aufbau eines DMS <sup>8</sup>**

Die linke Seite der Abbildung 2 zeigt die Auswirkungen des Druckes auf die Membran. Der einwirkende Druck bewirkt in der Mitte eine Dehnung der Membran. Gleichzeitig erfolgt auf den Außenseiten der Membran eine Stauchung. Die rechte Seite der Abbildung 2 zeigt einen Dehnungsmessstreifen bestehend aus vier Widerständen, die auf der Membran appliziert sind. Diese vier Widerstände werden zu einer Brückenschaltung, wie in der nachfolgenden Abbildung 3 zu sehen ist, verschaltet. Die Widerstände in den Brückenzweigen arbeiten gegensinnig, sodass ein besonders großes Ausgangssignal entsteht. Zugleich kompensieren sich gleichsinnige Effekte, wie der Absolutwert der Widerstände und ihr Temperaturkoeffizient.



**Abbildung 3: Messbrücke eines Drucksensors <sup>9</sup>**

Das Ausgangssignal  $U_D$  der Messbrücke setzt sich aus einem druckproportionalen Anteil  $U_p$  und einem ungewünschten Offset-Anteil  $U_o$  zusammen. Den Zusammenhang gibt die folgende Formel wieder:

$$U_D = S \cdot p \cdot U_{ref} + O \cdot U_{ref} = U_p + U_o$$

<sup>8</sup> [5] Tietze, U. & Schenk, Ch. (1999) Halbleiter-Schaltungstechnik, Seite 1242.

<sup>9</sup> [5] Tietze, U. & Schenk, Ch. (1999) Halbleiter-Schaltungstechnik, Seite 1243.

In dem druckproportionalen Anteil ist die Empfindlichkeit  $S$  des Drucksensors enthalten. Die Empfindlichkeit ist wie folgt definiert:

$$S = \frac{\Delta U_D}{\Delta p \cdot U_{ref}} = \frac{\Delta R}{\Delta p \cdot R}$$

Der druckproportionale Anteil und der Offset-Anteil liefern einen Betrag, der sich proportional zur Referenzspannung  $U_{ref}$  verhält. Um große Ausgangssignale aus der Messbrücke zu erhalten, werden oft hohe Referenzspannungen verwendet. Aufgrund der Eigenerwärmung des Sensors ist dies jedoch nur begrenzt möglich.<sup>10</sup>

Das Ausgangssignal der Messbrücke ist wegen der geringen Widerstandsänderung  $\Delta R$  sehr klein und Bedarf daher einer Verstärkung. Zu diesem Zweck werden meist Instrumentenverstärker eingesetzt, um eine Belastung der Messbrücke zu verhindern. Über diese erfolgt zugleich eine Offsetkorrektur.

### 2.2.3 Temperaturabhängigkeit von Drucksensoren

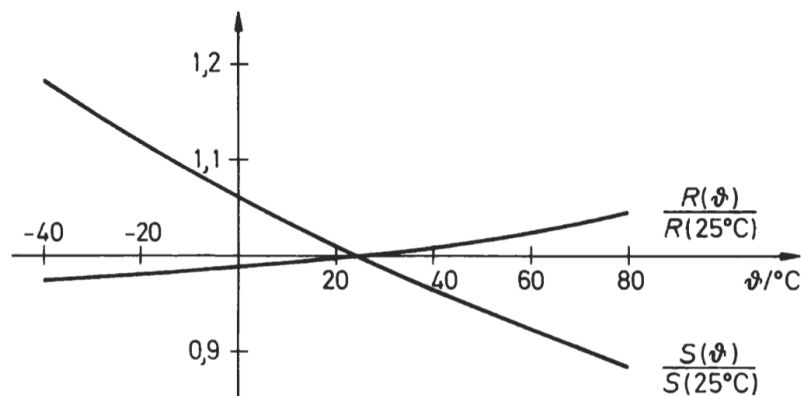


Abbildung 4: Einfluss der Temperatur auf piezoresistive Drucksensoren<sup>11</sup>

Dotierte Silizium-Widerstände, wie sie in der Druckmessung eingesetzt werden, besitzen die Eigenschaft, dass sich ihr Widerstand in Abhängigkeit von der Temperatur ändert. Der Kennlinienverlauf des Temperaturkoeffizienten  $TK_R$  ist in Abbildung 4 dargestellt. Er lässt sich durch die nachfolgende Formel beschreiben:

$$TK_R = \frac{\Delta R}{R \cdot \Delta \theta} \approx 1350 \frac{ppm}{K} = 0,135 \frac{\%}{K}$$

<sup>10</sup> vgl. [5] Tietze, U. & Schenk, Ch. (1999) Halbleiter-Schaltungstechnik, Seite 1242 ff.

<sup>11</sup> [5] Tietze, U. & Schenk, Ch. (1999) Halbleiter-Schaltungstechnik, Seite 1248.

Bei einer Verschaltung der Widerstände zu einer Wheatstone'schen Messschaltung, wie sie in Abbildung 3 zu sehen ist, ist die temperaturbedingte Widerstandsänderung nicht störend, wenn sie in allen Widerständen gleichermaßen groß ist und das Ausgangssignal nicht belastet wird. Problematisch ist jedoch die temperaturabhängige Druckempfindlichkeit des Sensors. Der Temperaturkoeffizient beträgt:

$$TK_S = \frac{\Delta S}{S \cdot \Delta \vartheta} \approx -2350 \frac{ppm}{K} = -0,235 \frac{\%}{K}$$

Wie in Abbildung 4 zu erkennen ist, sinkt die Druckempfindlichkeit bei einer Temperaturerhöhung um 40 °C bereits um ca. 10 %. Um die Druckmessung nicht zu verfälschen, muss die Verstärkung entsprechend mit der Temperatur erhöht werden. Dazu werden in der Regel Temperatursensoren in dem Drucksensor verbaut, um eine Temperaturkompensation direkt im Drucksensor durchzuführen. Eine Methode, um die Empfindlichkeitsabnahme durch steigende Temperaturen zu kompensieren, liegt in der Anhebung der Referenzspannung  $U_{ref}$ .<sup>12</sup>

Die Realisierung der Temperaturkompensation kann auf verschiedene Arten erfolgen. Nachfolgend sind zwei gängige Methoden aufgeführt:

- analoge Temperaturkompensation im Sensor und
- Temperaturkompensation durch Korrekturrechnung im Mikrocontroller.

## 2.3 Galvanische Sauerstoffsensoren

Zur Überwachung des Sauerstoffpartialdruckes werden in Kreislaufgeräten galvanische Sauerstoffsensoren verwendet. Im Folgenden soll zunächst der Begriff Partialdruck erklärt werden. Anschließend werden der Aufbau, die Funktion sowie die Eigenschaften eines galvanischen Sauerstoffsensors genauer erläutert.

### 2.3.1 Partialdruckgesetz

Das Partialdruckgesetz besagt, dass der Gesamtdruck eines Gasgemisches die Summe der Drücke ist, die jedes Gas für sich ausüben würde, wenn es alleine den gesamten verfügbaren Raum des Gasgemisches ausfüllen würde:

$$p_{ges} = p_1 + p_2 + p_3 + p_n$$

---

<sup>12</sup> vgl. [5] Tietze, U. & Schenk, Ch. (1999) Halbleiter-Schaltungstechnik, Seite 1248.



Wird das Gasgemisch komprimiert, so erhöhen sich proportional auch die Partialdrücke der im Gasgemisch enthaltenden Gase. Die nachfolgende Betrachtung zeigt dies anhand eines Beispiels auf:

Die Luft setzt sich aus ca. 78 % Stickstoff und ca. 21 % Sauerstoff zusammen. Den Restanteil von ca. 1 % bilden Kohlenstoffdioxid und Edelgase. Der Gesamtdruck auf Meereshöhe beträgt ca. 1 bar absolut. Somit liegt der Sauerstoffpartialdruck bei ca. 0,21 bar. Der Stickstoffpartialdruck beläuft sich auf ca. 0,78 bar.

Wird die Luft zusätzlich um 1 bar komprimiert, wie es beim Tauchen in 10 m Tiefe geschieht, so beträgt der Gesamtdruck 2 bar absolut. Nun liegt der Sauerstoffpartialdruck der komprimierten Luft bei ca. 0,42 bar. Der Stickstoffpartialdruck beträgt ca. 1,56 bar.

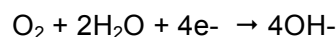
Somit gilt der folgende allgemeine Zusammenhang:

$$p_i = V_i \cdot p_{ges}$$

- $p_i$  - Partialdruck
- $V_i$  - Volumenanteil des Gases i
- $p_{ges}$  - Gesamtdruck

### 2.3.2 Funktionsprinzip von galvanischen Sauerstoffsensoren

Galvanische Sauerstoffsensoren funktionieren nach dem Prinzip einer galvanischen Zelle. Durch Diffusion gelangt das zu überwachende Gasgemisch durch die Kunststoffmembran in den flüssigen Elektrolyt des Sensors. Im Elektrolyt befinden sich eine Arbeitselektrode (Goldelektrode) und eine Gegenelektrode. Sowohl der Elektrolyt als auch das Elektrodenmaterial sind so gewählt, dass an der Arbeitselektrode der im Gasgemisch enthaltene Sauerstoff elektrochemisch reduziert wird. Die folgende Reaktionsgleichung stellt diesen Vorgang dar:



Gleichzeitig oxidiert die Gegenelektrode (Bleielektrode):



Bei dieser elektrochemischen Reaktion fließt ein Strom durch den Sensor. Dieser ist proportional zu dem Sauerstoffpartialdruck des zu überwachenden Gasgemisches. Durch ihr lineares Verhalten lassen sich diese Sensoren für die Überwachung in Kreislaufgeräten einsetzen.<sup>13</sup>

---

<sup>13</sup> vgl. [7] Drägerwerk AG & Co. KG (2010), O<sub>2</sub>-Sensoren, Seite 1.

### 2.3.3 Technische Daten eines galvanischen Sauerstoffsensors

Abbildung 5 stellt einen Auszug der wesentlichen Daten aus dem Datenblatt eines galvanischen Sauerstoffsensors vom Typ OOD101 der Firma EnviteC dar. Das Datenblatt dieses Sensors befindet sich im Anhang dieser Arbeit. Anhand der technischen Daten sollen die charakteristischen Eigenschaften des Sensors genauer erläutert werden.

#### Product Specification

#### Oxygen Sensor OOD101 / OOD101-1

---

|                             |   |
|-----------------------------|---|
| Measurement Range:          | 0-100 % oxygen  |
| Output in ambient air:      | 7 to 13 mV  |
| Accuracy and Repeatability: | < 1 % vol. O <sub>2</sub> when calibrated at 100 % Oxygen               |
| Linearity error:            | < 3 % relative  |
| Response time:              | < 5sec. to 90 % of final value  |
| Zero Offset Voltage:        | < 40 $\mu$ V in 100 % nitrogen  |
| Influence of Humidity:      | -0.03 % rel. Per % RH at 25°C   |
| Influence of Pressure:      | proportional to change in oxygen partial pressure                       |
| Operating Temperature:      | 0 to 50 °C  |
| Temperature Compensation:   | built-in NTC compensation   |
| Effect of Temperature:      | between +25 °C and +40 °C: 3 % relative error                           |
| Operating Humidity:         | 0-99 % RH non-condensing  |
| Long Term Output Drift:     | < 1 % vol oxygen per month<br>typically < - 15 % relative over lifetime |
| Recommended Load:           | $\geq$ 10 kOhms   |
| Warm-Up Time:               | < 30 minutes, after replacement of sensor                               |
| Nominal Sensor Lifetime:    | $\geq$ 500 000 % vol oxygen hours                                       |

---

All specifications are applicable at standard conditions: 1013 hPa, 25°C dry ambient air

**Abbildung 5: Technische Daten des Sauerstoffsensors Typ: OOD101 / Firma: Envitec <sup>14</sup>**

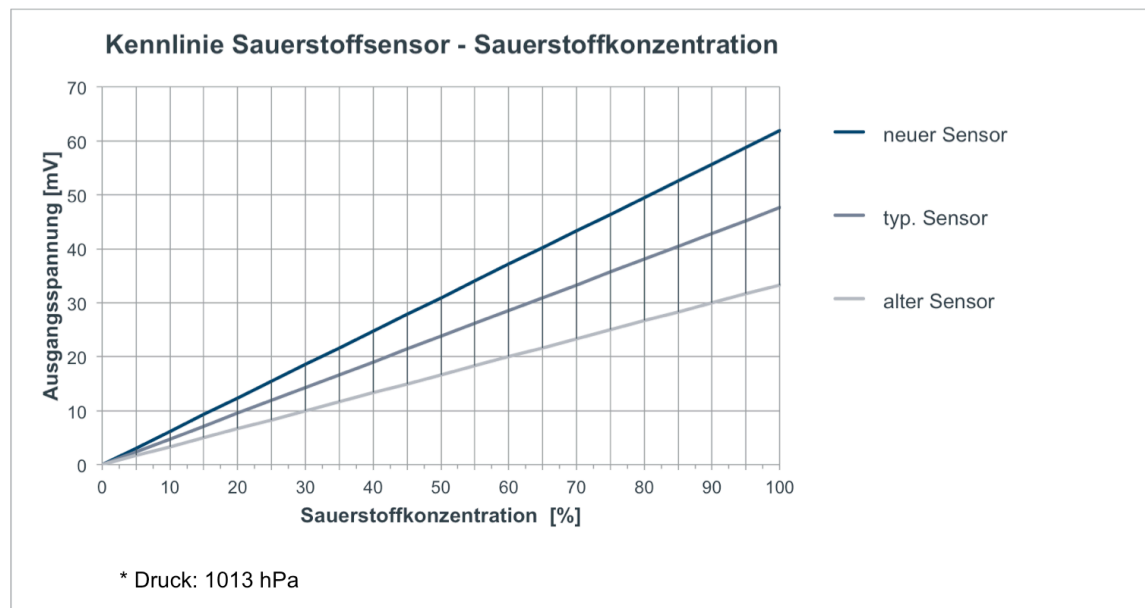
### 2.3.4 Kennlinie des Sauerstoffsensors OOD101

Die nachfolgende Abbildung 6 zeigt die Kennlinie des Sauerstoffsensors unter atmosphärischen Druck in Abhängigkeit der Sauerstoffkonzentration im Messgas. Sie weist ein lineares Verhalten auf. Wie aus den technischen Daten zu entnehmen ist, ist der Sauerstoffsensor nicht langzeitstabil. Bei der Alterung des Sensors sinkt das Ausgangssignal des Sensors ab, was die Abbildung 6 ebenfalls aufzeigt. Die Lebensdauer eines galvanischen Sauerstoffsensors wird sowohl durch die Sauerstoffkonzentration als auch durch den Druck beeinflusst. Aufgrund dessen ist der Sensor vor jedem Tauchgang zu kalibrieren. Laut Datenblatt sollte diese Kalibrierung unter Flutung des Sensors mit 100 % reinem

---

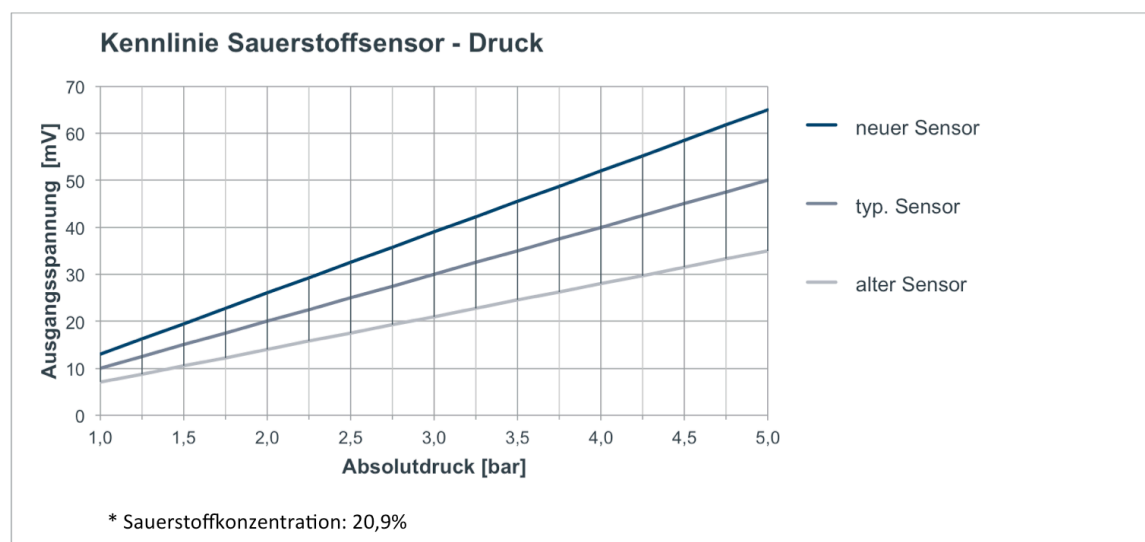
<sup>14</sup> [8] EnviteC-Wismar GmbH (2013), Product Specification Oxygen Sensor OOD101 / OOD101-1, Seite 1.

Sauerstoff erfolgen. Bei einer solchen Kalibrierung beträgt der Fehler  $< 1\%$  und ist damit vernachlässigbar klein (vgl. Abbildung 5).



**Abbildung 6: Kennlinie Sauerstoffsensor OOD101 EnviteC - Sauerstoffkonzentration**

Die Ausgangsgröße des Sauerstoffsensors ist sowohl von der Sauerstoffkonzentration als auch vom Druck abhängig. Als Ausgangssignal gibt der Sensor daher das Produkt aus Druck und Sauerstoffkonzentration aus, welcher dem Sauerstoffpartialdruck entspricht. Den Zusammenhang gibt die folgende Abbildung 7 wieder. Sie zeigt das Ausgangssignal in der Abhängigkeit vom Druck bei einem konstanten Sauerstoffanteil von 20,9 % in der Luft.



**Abbildung 7: Kennlinie Sauerstoffsensor OOD101 EnviteC - Druck**

### 2.3.5 Zeitliches Verhalten von Sauerstoffsensoren

Der Ausschnitt des Datenblatt zum Sauerstoffsensor OOD101 (vgl. Abbildung 5) verdeutlicht, dass es sich bei dem galvanischen Sauerstoffsensor um ein träges System handelt. So benötigt der Sauerstoffsensor 5 Sekunden, um das Ausgangssignal auf 90 % des finalen Wertes einzustellen.

## 2.4 Akkumulatoren

Im Folgenden werden die Eigenschaften von derzeit marktüblichen Akkumulatoren betrachtet. Die Darstellung erfolgt unter den wesentlichen Aspekten der Nennspannung, der Kapazität und der Energiedichte. Darüber hinaus werden das Ladeverhalten sowie der Ladevorgang betrachtet.

### 2.4.1 Ni-MH-Akkumulator

Ni-MH-Akkumulatoren kennzeichnet eine niedrige Nennspannung von 1,2 V. Übliche Bauformen dieses Akkumulators sind zylindrische Gehäuse in unterschiedlichen Größen. Als Standardgröße gelten Größen wie A, AA und AAA. Die Kapazität ist deutlich von der Größe der Zelle abhängig. Derzeitig reichen die Kapazitäten erhältlicher Ni-MH-Akkumulatoren von 700 mAh bis 3300 mAh. Das Gewicht einer Zelle ist nicht nur vom Volumen der Zelle abhängig, sondern auch von der Kapazität.<sup>15</sup>

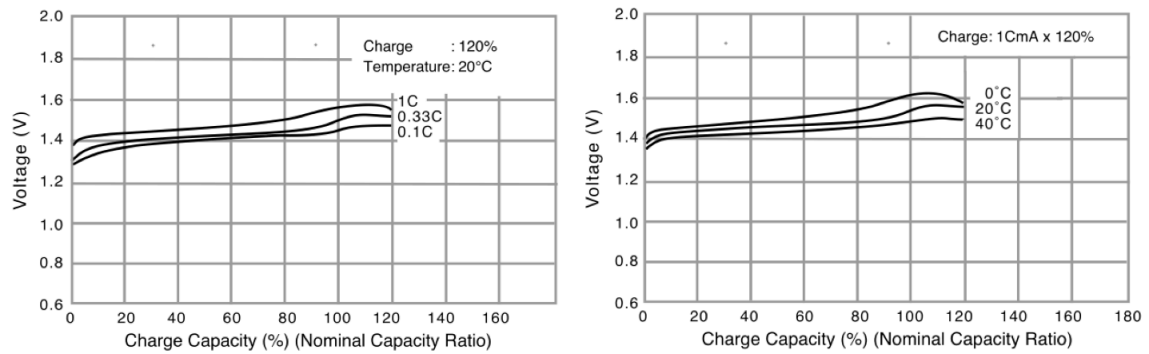
#### ***Laden von Ni-MH-Akkumulatoren***

Die Ladeeigenschaften eines Ni-MH-Akkumulators werden durch den Strom, die Temperatur und der Zeit beeinflusst. Wie in Abbildung 8 zu sehen ist, steigt die Ladespannung eines Akkumulators mit zunehmendem Ladestrom oder bei niedriger Temperatur. Die Ladeeffizienz ist ebenfalls von den oben genannten Faktoren abhängig. Ni-MH-Akkumulatoren sollten in einem Temperaturbereich von 0 °C bis 40 °C und mit einem maximalen konstanten Strom von 1 C/h<sup>16</sup> geladen werden. Hersteller von Ni-MH-Akkumulatoren empfehlen jedoch ein Laden mit niedrigeren Ladeströmen in einem Temperaturbereich von 10 °C bis 30 °C.

---

<sup>15</sup> vgl. [9] Panasonic (2011), Ni-MH Handbook , Seite 6.

<sup>16</sup> C ist die Angabe der Kapazität des Akkumulators; Einheit: mAh.



**Abbildung 8: Ladekennlinien von Ni-MH Akkumulatoren**<sup>17</sup>

### **Schnellladeverfahren bei Ni-MH-Akkumulatoren**

Ni-MH-Akkumulatoren lassen sich in einem Schnellladeverfahren laden. Dazu wird die Zelle mit einem maximalen konstanten Strom von 1 C/h geladen und gleichzeitig die Spannung und die Temperatur überwacht. Beträgt der Temperaturanstieg der Zelle 1 - 2 °C pro Minute, ist das Laden abgeschlossen. Ebenfalls führt das Detektieren des charakterisierenden Spannungseinbruchs von 5 - 10 mV zum Beenden des Ladevorgangs. Ein Überschreiten einer Grenztemperatur bzw. einer Grenzspannung von 1,8 V bricht den Ladevorgang zum Schutz des Akkumulators ab. Überschreitet der Ladevorgang eine Zeit von 90 Minuten, so wird der Ladevorgang ebenfalls abgebrochen.<sup>18</sup>

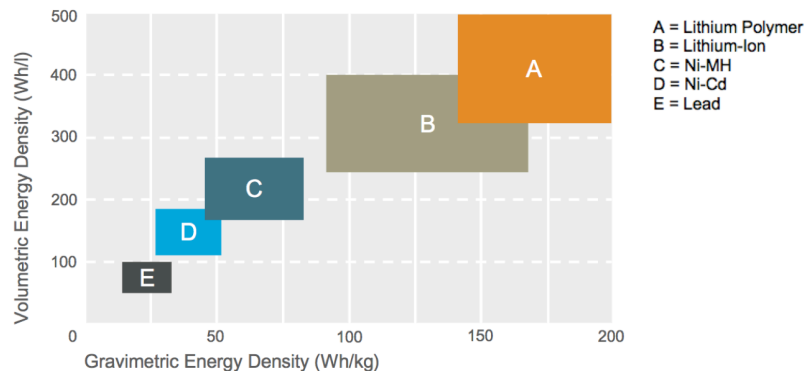
## **2.4.2 Li-Ion-Akkumulator**

Li-Ion-Akkumulatoren besitzen eine hohe Nennspannung von 3,6 V. Damit ist die Nennspannung im Gegensatz zu Ni-MH-Akkumulatoren, die eine Nennspannung von 1,2 V besitzen, um den Faktor 3 größer. Zudem zeichnen sich Li-Ionen-Akkumulatoren durch eine hohe gravimetrische und volumetrische Energiedichte aus, die die Werte von Ni-MH-Akkumulatoren weit übersteigen. Des Weiteren lassen sich Li-Ion-Akkumulatoren in unterschiedlichsten Bauformen herstellen, was diese gerade bei mobilen Anwendungen beliebt macht. Die folgende Darstellung (Abbildung 9) zeigt anschaulich die Energiedichten verschiedener Akkumulator-Technologien.

<sup>17</sup> [9] Panasonic (2011), Ni-MH Handbook, Seite 14.

<sup>18</sup> vgl. [9] Panasonic (2011), Ni-MH Handbook, Seite 17 f.

### ENERGY DENSITY FOR RECHARGEABLE BATTERY SYSTEMS:



**Abbildung 9: Energiedichten verschiedener Akkumulator-Technologien**<sup>19</sup>

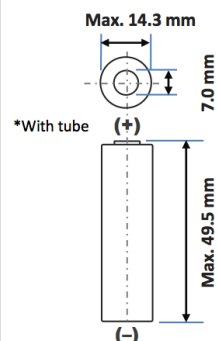
Die nachfolgende Betrachtung erfolgt anhand eines Li-Ion-Akkumulators der Firma Panasonic vom Typ UR1450P. Dieser Akkumulator besitzt die gleichen Maße wie ein Ni-MH Akkumulator der Größe AA, was den Vergleich der beiden Technologien vereinfacht. Die folgende Abbildung 10 zeigt einen Ausschnitt aus dem Datenblatt des Herstellers.

#### Specifications

|                               |  |
|-------------------------------|--|
| Rated capacity <sup>(1)</sup> | Min. 800mAh  |
| Capacity <sup>(2)</sup>       | Min. 800mAh<br>Typ. 840mAh   |
| Nominal voltage               | 3.7V   |
| Charging                      | CC-CV, Std. 560mA, 4.20V, 3.0 hrs                                      |
| Weight (max.)                 | 21.0 g   |
| Temperature                   | Charge: 0 to +45°C<br>Discharge: -20 to +60°C<br>Storage: -20 to +50°C |
| Energy density <sup>(3)</sup> | Volumetric: 396 Wh/l<br>Gravimetric: 148 Wh/kg                         |

<sup>(1)</sup> At 20°C <sup>(2)</sup> At 25°C <sup>(3)</sup> Energy density based on bare cell dimensions

#### Dimensions



For Reference Only

**Abbildung 10: Kenndaten Li-Ion-Akkumulator UR14500P**<sup>20</sup>

Die Kapazität des Akkumulators ist mit typ. 840 mAh angegeben. Dieser Wert bezieht sich auf die Nennspannung des Akkumulators von 3,7 V. Damit beträgt die Energie des Akkumulators 3,1 Wh. Seine gravimetrische Energiedichte beträgt mit 21,0 g Zellgewicht 148 Wh/kg. Im Vergleich hierzu stellt ein Ni-MH-Akkumulator der Größe AA mit einer Kapazität 2000 mA eine Energie von 2,4 Wh bereit. Er hat dabei ein Gewicht von 26 g.<sup>21</sup> Seine

<sup>19</sup> [10] VARTA Microbattery GmbH (2008), Sales Program and Technical Handbook, Seite 3.

<sup>20</sup> [11] Panasonic (2012), Lithium Ion UR14500P, Seite 1.

<sup>21</sup> vgl. [9] Panasonic (2011), Ni-MH Handbook, Seite 20.

Energiedichte beträgt damit 92,3 Wh/kg. Folglich verdeutlicht dieser Vergleich, dass Li-Ion-Akkumulatoren eine weit höhere Energiedichte besitzen. Somit kann die oben dargestellte Abbildung 9 bestätigt werden.

### Laden von Li-Ion-Akkumulatoren

Li-Ion-Akkumulatoren werden nach dem CC/CV-Verfahren<sup>22</sup> geladen. Dabei wird der Akkumulator zunächst mit einem konstanten Strom geladen bis die Ladeschlussspannung von 4,2 V erreicht ist. Nun folgt das Laden des Akkumulators mit einer konstanten Spannung von 4,2 V. Hierbei sinkt der Ladestrom immer weiter ab bis der Ladevorgang beendet ist. Die Ladeschlussspannung ist auf  $\pm 50$  mV genau einzuhalten. Des Weiteren sollte ein Laden des Akkumulators ausschließlich in einer Umgebungstemperatur von 0 °C bis 45 °C stattfinden. Die nachfolgende Darstellung (Abbildung 11) zeigt den beschriebenen Ladeprozess eines Li-Ion-Akkumulators des Typs UR14500P:

#### Charge Characteristics

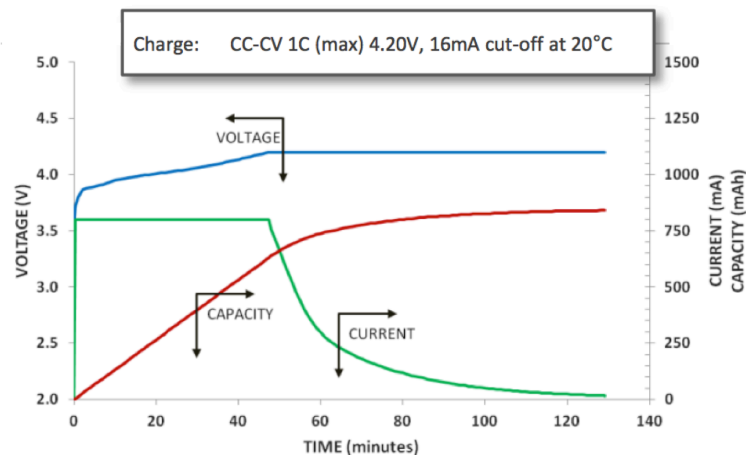


Abbildung 11: Ladekennlinie Li-Ion Akkumulator UR14500P<sup>23</sup>

## 2.5 Displays

Dieser Abschnitt beschreibt den Aufbau und die Funktionsweise von TFT/LC-Displays und OLED-Displays. Zudem erfolgt eine Erläuterung der charakteristischen Kenndaten von Displays. Damit bildet dieser Abschnitt die Grundlage für die Entscheidungsfindung und die Auswahl des Displays in Kapitel 4 „Systemkonzept“.

<sup>22</sup> CC/CV - Constant-Current/Constant-Voltage

<sup>23</sup> [11] Panasonic (2012), Lithium Ion UR14500P, Seite 1.

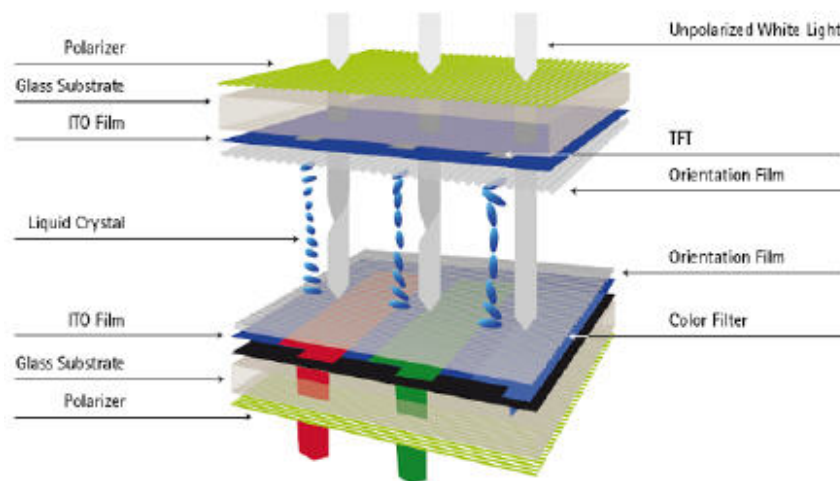
## 2.5.1 TFT/LC-Displays

### *Aufbau eines TFT/LC-Displays*

Im Folgenden Abschnitt wird der Aufbau von TFT/LC-Displays vorgestellt. Hierfür muss zunächst die Abkürzung TFT geklärt werden. TFT steht für **Thin Film Transistor**. Dies beschreibt die eingesetzten Steuerungselemente, die aktiv die einzelnen Bildelemente eines LC-Displays ansteuern. Ein LC-Display oder im deutschen Flüssigkristallanzeige ist eine Anzeige, dessen Funktion darin besteht, dass Flüssigkristalle die Polarisationsrichtung des Lichts beeinflussen.

Ein TFT/LC-Display ist aus mehreren Lagen aufgebaut. Zwischen den mit Elektroden bestückenden Glasplatten befinden sich die Flüssigkristalle. Auf den Innenseiten der Glasplatten sind transparente Elektroden und eine Schicht zur Orientierung der LC-Moleküle sowie ein einseitig aufgebracht Farbfilter angebracht. Auf den Außenseiten befinden sich jeweils Polarisationsfilter. Die Flüssigkristalle zwischen den Glasscheiben bilden das Herzstück eines LC-Displays. Sie wirken in Kombination mit Polarisationsfiltern als „Licht-ventil“ für die Hintergrundbeleuchtung, dem sogenannten „Backlight“. <sup>24</sup>

Die Abbildung 12 zeigt den Aufbau eines Bildpixels. Dieser besteht aus einzelnen Subpixeln der drei Grundfarben rot, grün und blau. Die Ansteuerung der einzelne Subpixel geschieht durch die Thin-Film-Transistoren (TFT).



**Abbildung 12: Aufbau eines TFT/LC-Displays** <sup>25</sup>

<sup>24</sup> vgl. [12] Merck KGaA (2013), Flüssigkristalle – LCD Technologie.

<sup>25</sup> [12] Merck KGaA (2013), Flüssigkristalle – LCD Technologie.



### **Funktionsweise eines TFT/LC-Display**

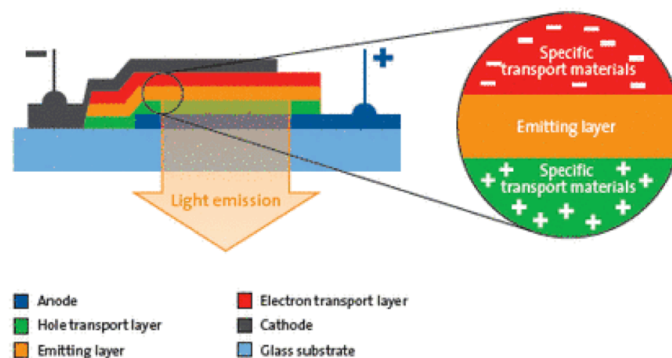
Das Licht der Hintergrundbeleuchtung trifft auf den ersten Polarisationsfilter. Der Polarisationsfilter lässt nur eine bestimmte Schwingungsebene des Lichts passieren. Das polarisierte Licht trifft danach auf die Flüssigkristalle. Wird Spannung an die Elektroden angelegt, verändert sich die Anordnung der LC-Moleküle und verändert damit auch die Schwingungsebene des Lichts, sodass das Licht durch den Farbfilter und den um 90° verdrehten zweiten Polarisationsfilter austreten kann. Liegt keine Spannung an den Elektroden an, so wird die Schwingungsebene des Lichtes nicht beeinflusst und kann den zweiten Polarisationsfilter nicht passieren. In diesem Fall bleibt das Pixel schwarz.<sup>26</sup>

## **2.5.2 OLED-Displays**

### **Aufbau eines OLED-Displays**

OLED-Displays sind selbst leuchtende Displays und benötigen daher anders als LC-Displays keine Hintergrundbeleuchtung. Die Abkürzung OLED steht für organische Leuchtdiode (engl. organic light-emitting-diode).

OLED-Displays bestehen aus mehreren Schichten. Grundlage für den Aufbau bildet eine dünne Glasplatte oder eine flexible Folie, das sogenannte Substrat, auf dem eine transparente Anode aufgebracht ist. Darüber befindet sich eine in Ladungsleitungsschichten eingebettete Emitterschicht. Diese organische Halbleiterschicht bildet das Herzstück der OLED. Sie besteht aus kleinen Molekülen oder langkettigen Polymeren. Abschluss bildet eine Metall-Kathode. Die nachfolgende Abbildung 13 zeigt den schematischen Aufbau einer OLED.<sup>27</sup>



**Abbildung 13: Schematischer Aufbau einer Mehrschicht-OLED<sup>28</sup>**

<sup>26</sup> vgl. [12] Merck KGaA (2013), Flüssigkristalle – LCD Technologie.

<sup>27</sup> vgl. [13] Merck KGaA (2013), OLEDs - Aufbau und Funktionsprinzip.

<sup>28</sup> [14] Novaled (2013), OLEDs.

### ***Funktionsweise eines OLED-Displays***

Wird eine Spannung an die Elektroden angelegt, so injiziert die Kathode Elektronen in die organische Schicht. Gleichzeitig bildet die Anode Löcher, die sie in die halbleitende, organische Schicht injiziert. Bei der Rekombination von positiven Ladungsträgern (Löchern) und negativen Ladungsträgern (Elektronen) in der Emitterschicht entstehen zunächst angeregte Zustände, sogenannte Exiztonen. Diese kehren unter Lichtemission (Aussendung von Photonen) in ihren Grundzustand zurück. Die Molekularstruktur der organischen Halbleiterschicht bestimmt die Farbe des Lichts.<sup>29</sup>

Ein OLED-Display besteht wie ein TFT/LC-Display aus einzelnen Pixeln, die sich jeweils aus drei einzelnen Subpixeln der Farben rot, grün und blau zusammensetzen. Sie werden ebenfalls über integrierte Dünnschicht-Transistoren (TFT) angesteuert.

### **2.5.3 Charakteristisch Kenndaten von Displays**

Im Folgenden sollen charakteristische Kenndaten beider vorgestellter Display-Technologien erläutert werden. Auf Grundlage dieser Kenndaten erfolgt im Kapitel Systemkonzept die Auswahl der Displaytechnologie für den Tauchcomputer.

#### ***Response Time***

Die Response-Time bezeichnet die Zeit, die ein Bildelement benötigt, um von einem nichtaktiven schwarzen in einen beleuchtenden und wieder zurück in den schwarzen unbeleuchteten Zustand zurückzukehren.

LC-Displays müssen dazu, wie oben im Abschnitt 2.3.1 beschrieben, Flüssigkristalle bewegen, um die Polarisationsrichtung des Lichts zu beeinflussen. Dieser Prozess verläuft sehr träge. Zudem wird die Beweglichkeit der Flüssigkristalle stark von der Temperatur beeinflusst. So hemmen niedrige Temperaturen die Beweglichkeit der Flüssigkristalle. Im Gegensatz dazu bietet die OLED-Technologie eine Response-Time, die im Mikrosekundenbereich angesiedelt ist und im Vergleich zur LCD-Technologie um einen Faktor 1.000 schneller ist.

#### ***Energieverbrauch***

Der Energieverbrauch der LCD-Technologie wird im Wesentlichen von der Hintergrundbeleuchtung bestimmt. Die Leistungsaufnahme ist unabhängig vom dargestellten Bild konstant. Aufgrund dessen werden heutzutage energiesparende LEDs eingesetzt. Des Weiteren wird in mobilen Anwendungen häufig eine Regelung der Helligkeit der Hintergrundbeleuchtung in Abhängigkeit des Umgebungslichts implementiert.

---

<sup>29</sup> vgl. [13] Merck KGaA (2013), OLEDs- Aufbau und Funktionsprinzip.

Bei der OLED-Technologie hingegen verbrauchen nur die angesteuerten Pixel Energie. Damit ist der Energieverbrauch proportional zur Anzahl der angesteuerten Pixel. So weisen OLED-Displays im Vergleich zu LC-Displays eine deutlich bessere Energiebilanz auf. Vergleichstests zeigen eine um 55 % geringere Leistungsaufnahme bei OLED-Displays.

### ***Kontrast und Blickwinkel***

Das Kontrastverhältnis gibt das Verhältnis zwischen einem angesteuerten leuchtenden Bildpunkt und der nichtangesteuerten schwarzen Fläche an. Bei LC-Displays ist sowohl die Helligkeit der Hintergrundbeleuchtung als auch die Lichtabschottung der nicht angesteuerten Pixel maßgebend.

Die OLED-Technologie erreicht deutlich bessere Kontrastverhältnisse, da hier nur das angesteuerte Pixel leuchtet. Der restliche Hintergrund behält ein sattes tiefes Schwarz, da dieser nicht angesteuert wird und dadurch kein Licht emittiert. Aus diesem Grund erzielen die Kontrastverhältnisse von OLED-Displays in etwa 20 Mal höhere Werte als LC-Displays.

Der Blickwinkel ist an den Kontrast gekoppelt. Bei LC-Displays nimmt bei zunehmender Neigung des Displays der Kontrast ab. Auch die Farben verändern sich. Als Blickwinkel wird oft der Neigungswinkel definiert, bei dem der Kontrast auf 10 % absinkt.

Da OLED-Displays selbstleuchtend sind, wird der Kontrast nicht vom Blickwinkel auf das Display beeinflusst, weshalb der Blickwinkel theoretisch annähernd 180° beträgt. Anders als bei LC-Displays bleiben bei OLED-Displays die Farben unabhängig vom Blickwinkel unverändert.

### ***Lebensdauer***

Bei der LCD-Technologie wird die Lebensdauer über die Hintergrundbeleuchtung definiert. Diese nimmt während des Betriebs ab. Das Ende der Lebensdauer wird mit 50 % der ursprünglichen Helligkeit definiert. Um die Lebensdauer zu erhöhen, wird die Helligkeit nach Bedarf gesteuert.

Die geringe Lebensdauer stellt ein wesentliches Problem der noch jungen OLED-Technik dar. Bei OLED-Displays wird die Lebensdauer ebenfalls in der Zeitdauer angegeben, bis das Display die Hälfte der Helligkeit erreicht hat. Diese Angabe bezieht sich auf die Ansteuerung aller Pixel, also einem kompletten weißen Display bei voller Leistungsaufnahme. Die tatsächliche Leistungsaufnahme hängt jedoch vom dargestellten Bild ab. Tests zeigten auf, dass die durchschnittliche Leistungsaufnahme von Bildinhalten lediglich bei 30 % liegt, was praktisch zu einer Erhöhung der Lebenszeit um den Faktor 3 führt. Bei OLED-Displays altern nur die angesteuerten Pixel. Im Folgenden sind drei unterschiedliche Strategien zur Erhöhung der Lebenszeit angeführt:

- Invertieren von Bildinhalten
- Verschieben von Bildinhalten auf dem Display und
- Vermeiden von ständigem Betrieb mit voller Helligkeit.<sup>30</sup>

---

<sup>30</sup> vgl. [15] Voigt, C. (2008), *Aktiv-Matrix OLEDs*. Elektronik Industrie, Ausgabe 6 - 2008, Seite 49 f.

## 3 Präzisierung der Systemanforderungen

Nachdem im vorherigen Kapitel auf die Grundlagen und den Stand der Technik eingegangen wurde, wird in diesem Kapitel das Ziel des Projekts definiert und die Zielfunktion der Schaltung erläutert. Es werden darüber hinaus die einzuhaltenden Zielparameter der Schaltung bestimmt. Aufgrund dieser festgelegten Zielparameter erfolgt im abschließenden Kapitel „Ergebnisse und Ausblick“ eine Bewertung der Ergebnisse dieser Arbeit.

### 3.1 Zieldefinition

Wie bereits einleitend beschrieben, besteht die Aufgabe dieser Diplomarbeit in der Entwicklung und der Auslegung eines Tauchcomputers. Für den Aufbau des Tauchcomputers soll ein Mikrocontroller der Firma Atmel ausgewählt werden, da für diese Mikrocontroller der benötigte Programmier- bzw. Debugging-Adapter bereits vorhanden ist. Auch die Entwicklungsumgebung „AVR-Studio“ wird vom Hersteller kostenlos zur Verfügung gestellt.

Für den Tauchcomputer ist ein farbiges Grafikdisplay vorzusehen, sodass Überschreitungen von Grenzwerten oder Warnungen farbig auf dem Display ausgegeben werden können. Die Displaygröße ist mit 2,4“ vom Auftraggeber vorgegeben.

Mit der vorgegebenen Größe des Displays sind auch die Maße der Leiterplatte definiert, da das Abmaß der Leiterplatte die Maße des Displays nicht übersteigen soll. Das Abmaß der Platinen ist folglich auf eine maximale Größe von 43 mm x 60 mm festgesetzt.

Da der Auftraggeber die Möglichkeit der Kommunikation des Tauchcomputers mit einem PC wünscht, ist eine USB-Schnittstelle auf dem Tauchcomputer zu integrieren. Um die Kommunikation zwischen dem PC und dem Mikrocontroller einfach zu halten, ist hierfür ein IC der Firma FTDI vom Typ FT232RL einzusetzen. Dieser ermöglicht durch Anbindung über eine einfache USART-Schnittstelle an einen Mikrocontroller die Kommunikation via USB mit dem PC.

Der Tauchcomputer stellt eine mobile Anwendung dar. Aus diesem Grund soll er über einen Akkumulator versorgt werden. Das Laden des Akkumulators kann dabei über die vorgesehene USB-Schnittstelle erfolgen. Der Akkumulator ist vor Tiefentladung zu schützen. Die Laufzeit, die der Tauchcomputer garantieren muss, ist mit 20 Stunden vom Auftraggeber vorgegeben. Gefordert ist zudem, dass der Tauchcomputer einen Standby-Betrieb realisieren kann.

Die Einsatztiefe des Tauchcomputers ist mit 180 m definiert. Ziel ist es, dass die Ausgabe der Tauchtiefe auf dem Display mit einer Auflösung von 0,1 m erfolgen kann. Da die Tauchtiefe für den Taucher eine lebenswichtige Messgröße darstellt, muss die Druckmessung redundant ausgeführt werden, um bei einem Ausfall eines Drucksensors die Tauchtiefe sicher bestimmen zu können. Für die Entwicklung ist es weiterhin notwendig, dass der Drucksensor die Tauchtiefe auf 1 m genau bestimmen kann.

Neben der Tauchtiefe stellt die Tauchzeit eine weitere für den Taucher relevante Größe dar, da über die Tauchtiefe und die Tauchzeit der Dekompressionsaufstieg bestimmt wird. Der Tauchcomputer muss daher eine Möglichkeit zur genauen Bestimmung der Tauchzeit bieten. Zudem ist eine Anzeige von Datum und Uhrzeit vom Auftraggeber gewünscht.

Eine weitere Vorgabe des Auftraggebers bezieht sich auf die Überwachung des Sauerstoffpartialdruckes. Diese muss über das Einlesen von drei galvanischen Sauerstoffsensoren erfolgen. Der Messbereich des Sauerstoffpartialdruckes ist mit 0,21 bis 1,65 bar vom Auftraggeber definiert. Für die Messung werden die in den Grundlagen vorgestellten galvanischen Sauerstoffsensoren des Typs OOD101 vom Hersteller EnviteC verwendet. Die Ausgabe des gemessenen Sauerstoffpartialdruckes soll eine Auflösung von 0,01 bar besitzen. Die Genauigkeit der Messung ist überdies vom Auftraggeber mit  $\pm 0,03$  bar in Bezug auf einen idealen Sensor vorgegeben.

Der Wunsch des Auftraggebers ist es, eine Mikro-SD-Karte zum Abspeichern von Logging-Daten während des Tauchgangs in den Tauchcomputer zu integrieren. Diese Mikro-SD-Karte soll nur auf dem Tauchcomputer vorgesehen werden. Die Überprüfung dieser Funktion übersteigt jedoch den Umfang dieser Arbeit und wird aus diesem Grund nicht berücksichtigt.

## 3.2 Definition der Zielfunktion

Nachdem oben bereits die technischen Daten des Tauchcomputers und damit die Hardware definiert worden ist, werden in diesem Abschnitt die Funktionen erläutert, um die vom Auftraggeber gesetzten Zielparameter nachweisen zu können. Anhand dieser gestellten Zielfunktionen kann im abschließenden Kapitel auch eine Bewertung der Umsetzung erfolgen.

Um die Funktionen, die der Tauchcomputer bieten muss, nachweisen zu können, ist ein Betriebssystem zu entwickeln, welches alle geforderten Funktionen des Tauchcomputers vereinigt. Darüber hinaus soll das Betriebssystem einen ersten Systemtest unter realen Bedingungen ermöglichen. Anhand eines durchgeführten Langzeittests kann der Nachweis für die geforderte Laufzeit des Tauchcomputers von 20 Stunden erbracht werden. Vom Auftraggeber ist des Weiteren eine Untersuchung zur Leistungsaufnahme sowohl im Betrieb als auch in Standby-Modus gewünscht.

Das Betriebssystem muss die Messung und die Ausgabe der aktuellen Tauchtiefe realisieren können. Zudem soll das Betriebssystem die für den Taucher wichtige Größe der maximal erreichten Tauchtiefe ermitteln und auf dem Display anzeigen können. Auch die Tauchzeit stellt eine wichtige Größe dar und ist daher ebenfalls auf dem Display darzustellen.

Der Tauchcomputer muss die drei galvanischen Sauerstoffsensoren einlesen und einzeln auf dem Display ausgeben können. Da die Sauerstoffsensoren keine Langzeitstabilität besitzen, muss das Betriebssystem eine Möglichkeit bieten, die Sensoren einzeln zu kalibrieren. Die Kalibrierung soll über eine 1-Punkt-Kalibrierung unter 100 % reinem Sauerstoff erfolgen. Anhand dieser Funktion gilt es dem Auftraggeber die Genauigkeit der Messung nachzuweisen.

Wie bereits im vorangegangenen Abschnitt beschrieben, gehört die Anzeige von Datum und Uhrzeit zu den formulierten Vorgaben des Auftraggebers. Dazu muss der Tauchcomputer die Möglichkeit bieten sowohl das Datum als auch die Uhrzeit einstellen zu können.

Der Tauchcomputer ist mit einer USB-Schnittstelle ausgestattet. Über diese soll, wie in Abschnitt 3.1 erläutert wurde, die Kommunikation zu einem PC ermöglicht werden. Daher ist die Funktion der USB-Schnittstelle zu überprüfen.

### 3.3 Definition der Zielparameter

Die Zielparameter, die die Schaltung erfüllen muss, sind zur besseren Übersicht an dieser Stelle tabellarisch zusammenfassend dargestellt.

|  |                   |
|--|-------------------|
| • Tauchtiefe:                              | bis 180 m         |
| • Auflösung der Tiefenmessung:             | 0,1 m             |
| • Genauigkeit:                             | $\pm 1$ m         |
| • Messbereich des Sauerstoffpartialdrucks: | 0,21 bis 1,65 bar |
| • Auflösung Sauerstoffpartialdrucks:       | 0,01 mbar         |
| • Genauigkeit:                             | $\pm 0,03$ mbar   |
| • Maße der Platine:                        | 43 mm x 60 mm     |
| • Laufzeit des Tauchcomputers:             | 20 Stunden        |





## 4 Systemkonzept

Dieses Kapitel beschäftigt sich zunächst mit der Auswahl der für das Systemkonzept wichtigen Bauteile. Ein entscheidendes Auswahlkriterium stellt neben dem Aspekt der Genauigkeit der Messung von Druck und Sauerstoffpartialdruck auch die Leistungsaufnahme dar, da es sich bei dem Tauchcomputer um eine mobile Applikation handelt. Deshalb erfolgt im Anschluss an den Abschnitt zur Bauteilerauswahl die Betrachtung der Leistungsaufnahme der eingesetzten Bauteile. Auf Grundlage der Ergebnisse zur Untersuchung des Leistungsbedarfs und unter Berücksichtigung der in Kapitel 3 definierten Laufzeit kann ferner die Entscheidung für einen geeigneten Akkumulator getroffen werden. Die Vorstellung des Systemkonzepts in einem Blockschaltplan schließt das Kapitel ab. Die Realisierung des vorgestellten Systemkonzepts findet sich im nachfolgenden Kapitel 5.

### 4.1 Bauteilerauswahl

Dieser Abschnitt stellt die Auswahl der wesentlichen Komponenten wie Drucksensor, Mikrocontroller als auch Display vor. Die Sauerstoffsensoren sowie die Realisierung der USB-Schnittstelle wurden vom Auftraggeber bereits festgelegt.

#### 4.1.1 Vorstellung des ausgewählten Drucksensors

Zur Bestimmung der Tauchtiefe werden piezoresistive Drucksensoren eingesetzt. Die Funktionsweise und das Problem der temperaturabhängigen Druckempfindlichkeit dieser Sensoren wurden im Kapitel 2 bereits beschrieben. Die temperaturabhängige Druckempfindlichkeit macht eine Temperaturkompensation der Druckmessung notwendig, um eine präzise Messung zu erzielen. Das Kalibrieren der Drucksensoren stellt daher eine komplexe Aufgabe dar. Deshalb ist es sinnvoll Drucksensoren einzusetzen, die eine Temperaturkompensation besitzen und vom Hersteller bereits kalibriert ausgeliefert werden, sodass die geforderte Messgenauigkeit garantiert werden kann. Die Entscheidung fiel daher auf einen Drucksensor vom Typ MS5803-30BA. Bei diesem Drucksensor handelt es sich um einen hochauflösenden Absolutdrucksensor, der für die Tiefenmessung in mobilen Applikationen optimiert ist. Er kann wahlweise über eine SPI- oder I2C-Schnittstelle an den Mikrocontroller angeschlossen werden. Im Folgenden sind die Aspekte tabellarisch aufgelistet, die für die Auswahl des Drucksensors entscheidend waren:

## Technische Daten MS5803-30BA

|                             |                         |
|-----------------------------|-------------------------|
| Spannungsversorgung         | 1,8 - 3,6 V             |
| Messbereich:                | 0 - 30 bar              |
| Genauigkeit bei 0 - 6 bar:  | $\pm 50$ mbar           |
| Genauigkeit bei 0 - 20 bar: | $\pm 100$ mbar          |
| Auflösung:                  | 0,5 - 2,5 mbar          |
| Langzeitstabilität:         | max. - 50 mbar pro Jahr |
| Stromaufnahme im Betrieb:   | 1 $\mu$ A               |
| Stromaufnahme im Standby:   | < 0,15 $\mu$ A          |
| Maße:                       | 6,4 x 6,2 mm            |

Abbildung 14: Technische Daten MS5803-30BA <sup>31</sup>

Wie der Abbildung 14 entnommen werden kann, ist der Drucksensor in einem breiten Spannungsbereich einsetzbar und macht eine Messung in dem vorgegeben Messbereich von 180 m mit einer Auflösung von < 2,5 cm Tauchtiefe möglich. Die angegebene Genauigkeit der Messung in dem Messbereich entspricht  $\pm 1$  m. Bis zu einer Tiefe von 50 m beträgt die Genauigkeit  $\pm 0,5$  m. Aufgrund der niedrigen Stromaufnahme eignet sich dieser Sensor für den mobilen Einsatz. Auch die Größe des Sensors ist sehr gering. Die nachfolgende Abbildung 15 zeigt den Aufbau des Drucksensors vom Typ MS5803-30BA:

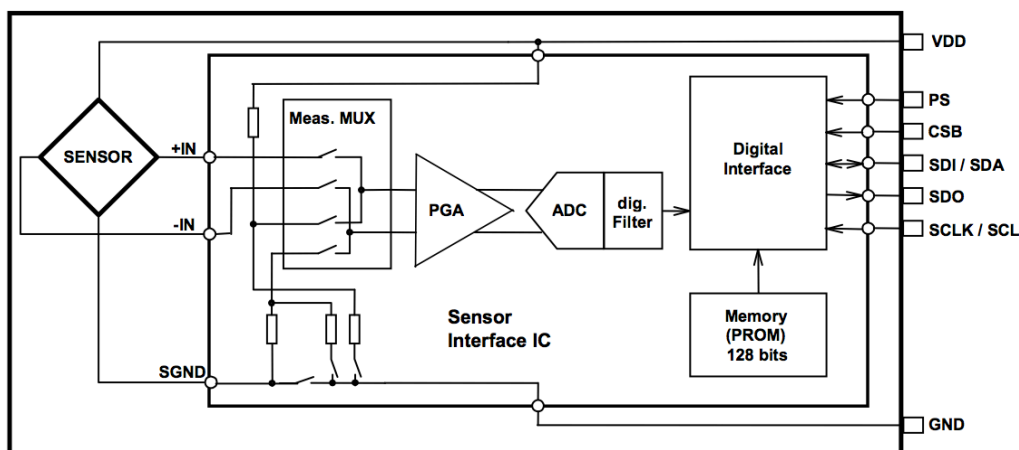


Abbildung 15: Blockschaftplan Drucksensor MS5803-30BA <sup>32</sup>

<sup>31</sup> vgl. [16] Measurement Specialties TM (2012), Datasheet MS5803-30BA Miniature 30 bar Module, Seite 1.

<sup>32</sup> [16] Measurement Specialties TM (2012), Datasheet MS5803-30BA Miniature 30 bar Module, Seite 5.

Der Drucksensor ermöglicht die Messung von Druck und Temperatur über die Messbrücke. Das kleine Ausgangssignal der Messbrücke wird über einen Programmable Gain Amplifier (PGA) intern verstärkt. Über einen internen A/D-Wandler wird das Ausgangssignal des PGAs gewandelt und anschließend digital gefiltert.

Der Sensor stellt die Rohdaten der digital gefilterten Temperatur- und Druckmessung zur Verfügung. Diese können über die digitale Schnittstelle des Sensors ausgelesen werden. Die Temperaturkompensation erfolgt über die Berechnung im Mikrocontroller. Dazu müssen vor der Messung die Kalibrierungsdaten des Sensors aus dem Speicher (PROM) ausgelesen werden. Diese wurden vom Hersteller in dem Speicher hinterlegt.

#### **4.1.2 Vorstellung der ausgewählten RTC**

Für die Umsetzung stellt die Messung der Tauchzeit, wie bereits beschrieben, eine wichtige Funktion dar. Zusätzlich ist vom Auftraggeber eine Anzeige von Datum und Uhrzeit gewünscht. Die Entscheidung fiel auf eine Realisierung dieser Funktionen über eine extern angeschlossene RTC. Dazu wurde eine RTC vom Typ DS1339 des Herstellers Maxim ausgewählt. Diese RTC besitzt eine I<sup>2</sup>C-Schnittstelle zur Kommunikation mit dem Mikrocontroller. Hierüber können Datum und Uhrzeit sowohl ausgelesen als auch eingestellt werden.

Der Vorteil des Einsatzes einer RTC besteht darin, dass der Mikrocontroller nicht mit der Berechnung der Zeit belastet wird. Die RTC kann über eine Pufferbatterie versorgt werden und ermöglicht damit einen autarken Betrieb. Damit muss nach einem Wechsel des Akkumulators weder die Uhrzeit noch das Datum neu eingestellt werden. Auch ein Reset des Mikrocontrollers hat keinen Einfluss auf den Betrieb RTC.

Die RTC ist in einem kleinen  $\mu$ SOP-8-Gehäuse untergebracht und ermöglicht damit eine platzsparende Umsetzung.

#### **4.1.3 Vorstellung des ausgewählten Mikrocontrollers**

Neben dem Drucksensor und der RTC ist ferner die Auswahl eines geeigneten Mikrocontrollers für die Realisierung des Projekts entscheidend. Die Entscheidung ist hierbei auf einen Mikrocontroller vom Typ ATxmega192 gefallen. Dieser Mikrocontroller basiert auf einer verbesserten AVR-8/16-Bit RISC-Architektur. Die Familie der ATxmega-Mikrocontroller zeichnet sich besonders durch ihren Einsatzbereich in portablen Low-Power-Anwendungen aus und bietet dabei hohe Performance. Die für die Auswahl entscheidenden Aspekte, welche für den Einsatz dieses Mikrocontrollers sprechen, sind nachstehend tabellarisch aufgelistet:

### Atmel - ATxmega192A3

---

- 3x SPI (Serial Peripheral Interfaces)
  - 2x I<sup>2</sup>C (Inter Integrated Circuit)
  - 7x USART (Universal Synchronous and Asynchronous serial Receiver and Transmitter)
  - 2x 8-channel, 12-bit, 2 Msp/s Analog to Digital Converters
  - Programmable Multi-level Interrupt Controller
  - Sleep Modes: Idle, Power-down, Standby, Power-save, Extended Standby
  - 50 Programmable I/O Lines
  - External Interrupts on all General Purpose I/O pins
  - Programming- and Debugging Interfaces: JTAG & PDI
  - Operating Voltage: 1.6 – 3.6 V
  - Speed performance:
    - 0 – 12 MHz at 1.6 – 3.6V
    - 0 – 32 MHz at 2.7 – 3.6 V
- 

**Abbildung 16: Technische Daten Atmel ATxmega192a3** <sup>33</sup>

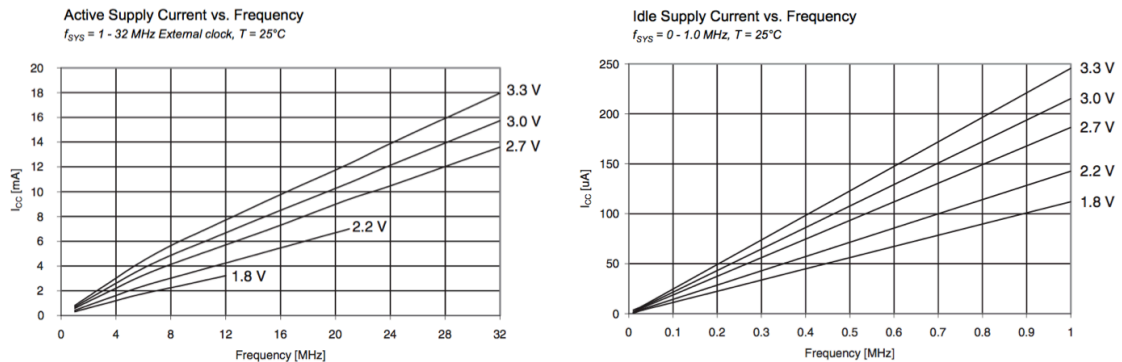
Die vielfältigen Anschlussmöglichkeiten von externer Peripherie über Schnittstellen stellt ein maßgebliches Auswahlkriterium dar, da die Drucksensoren über eine digitale Schnittstelle an den Mikrocontroller angeschlossen werden müssen. Um die Redundanz der Druckmessung zu gewährleisten, ist der Anschluss der Drucksensoren jeweils über eine separate Schnittstelle zu realisieren. Der Mikrocontroller bietet des Weiteren sowohl die Schnittstellen zum Anschluss der vom Auftraggeber gewünschten Mikro-SD-Karte als auch eine Anschlussmöglichkeit des FTDI-Chips zur Kommunikation des Tauchcomputers über eine USB-Schnittstelle mit dem PC. Auch die RTC kann über eine I<sup>2</sup>C-Schnittstelle an den Mikrocontroller angebunden werden.

Ein weiteres entscheidendes Auswahlkriterium stellte die A/D-Wandlung mit einer Auflösung von 12 Bit dar, da hierüber die Messung der Sauerstoffsensoren erfolgen soll. Die Alterung der Sauerstoffsensoren zieht, wie in den Grundlagen beschrieben (vgl. Abschnitt 2.3.4), ein Absinken der Ausgangsspannung des Sensors nach sich. Um diesen Effekt zu kompensieren, bedarf es einer hohen Auflösung der A/D-Wandlung. Herkömmliche Mikrocontroller der mega-Familie besitzen standardmäßig eine 10-Bit A/D-Wandlung.

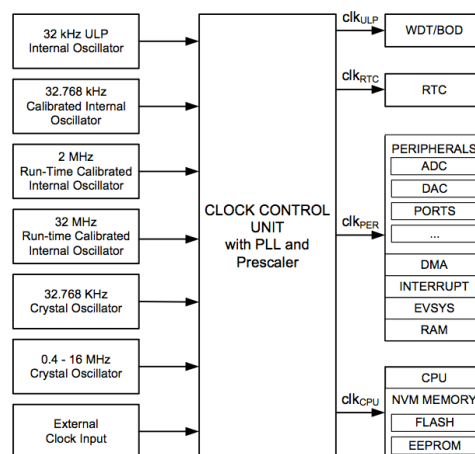
Die Auswahl des Mikrocontrollers wird neben der anzuschließenden Peripherie bedeutend von der Leistungsaufnahme bestimmt. Diese ist wesentlich von der Versorgungsspannung und der Taktfrequenz des Mikrocontrollers abhängig. Die nachfolgenden Abbildungen (Abbildung 17) zeigen die Stromaufnahme des Mikrocontrollers bei unterschiedlichen Versorgungsspannungen in Abhängigkeit der Taktfrequenz. Die linke Darstellung zeigt die Stromaufnahme in aktiven Betrieb. Im Gegensatz dazu ist in der rechten Darstellung die Stromaufnahme im Idle-Mode des Mikrocontrollers mit niedriger Taktfrequenz exemplarisch abgebildet.

---

<sup>33</sup> vgl. [17] Atmel (2013), Datasheet XMEGA A3, Seite 1.

Abbildung 17: Stromaufnahme ATxmega<sup>34</sup>

Die Mikrocontroller der ATxmega-Familie besitzen ein erweitertes Taktsystem, welches mit mehreren Taktquellen ausgestattet ist. Das Taktsystem erlaubt es, dass die CPU des Mikrocontrollers und die interne Peripherie mit unterschiedlichen Taktschwindigkeiten operieren können. Des Weiteren lässt sich die Taktquelle über eine PLL bzw. einen Vor-teiler (Prescaler) variabel einstellen. Durch die Möglichkeit des Umschaltens zwischen den variabel einstellbaren Taktquellen zur Laufzeit des Systems, kann die Stromaufnahme gezielt beeinflusst werden. Somit kann ein Standby-Betrieb des Mikrocontrollers mit einer besonders geringen Stromaufnahme realisiert werden. Der Mikrocontroller bildet das Herzstück des Tauchcomputers und kann die angeschlossene Peripherie abschalten bzw. in den Standby-Betrieb versetzen. Zudem kann dieser seine eigene Stromaufnahme auf ein Minimum reduzieren, wie es in der Abbildung 17 zu sehen ist. Das oben beschriebene Taktsystem mit seinen verschiedenen Taktquellen ist in der folgenden Abbildung 18 in einem Blockschaftplan, der dem Datenblatt des Mikrocontrollers entnommen ist, dargestellt.

Abbildung 18: Taktsystem ATxmega<sup>35</sup>

<sup>34</sup> [17] Atmel (2013), Datasheet XMEGA A3, Seite 72 & 75.

#### 4.1.4 Auswahl des Displays

Für die Umsetzung des Tauchcomputers wurde als Vorgabe der Einsatz eines farbigen Displays mit einer Bildschirmdiagonale von 2,4“ festgelegt. Der derzeitige Stand der Technik bietet, wie in Kapitel 2 beschrieben, Displays auf Basis der TFT/LCD-Technik und der OLED-Technologie an. Nachfolgend sind zwei Displays der jeweiligen Technologie gegenüberstellend anhand ihrer technischen Daten aufgelistet.

| Display            | OLED-Display<br>C0240QGLA      | TFT/LC-Display<br>INT024BTFT      |
|--------------------|--------------------------------|-----------------------------------|
| Technische Daten   |                                |                                   |
| Leistungsaufnahme  | typ. 260 mW, bei 30 % Pixel on | Backlight: 9,6 V / 20 mA - 192 mW |
| Kontrastverhältnis | 1000:1                         | 350:1                             |
| Blickwinkel        | 170°                           | 140°                              |
| Lebensdauer        | 20.000 Std                     | 45.000 Std                        |
| Farben             | 262 k                          | 65 k                              |
| Helligkeit         | typ. 200 cd/m <sup>2</sup>     | typ. 220 cd/m <sup>2</sup>        |
| Auflösung          | 240 x 320 Pixel                | 240 x 320 Pixel                   |

**Tabelle 2: Vergleich Displaytechnologien anhand technischer Daten<sup>36 37</sup>**

Wie bereits im Abschnitt 2.5.3 aufgezeigt, ist die Leistungsaufnahme bei TFT/LC-Displays wesentlich von der Hintergrundbeleuchtung abhängig. Die Leistung beträgt laut Tabelle 2 192 mW und stellt damit einen recht hohen Leistungsbedarf dar. Eine Möglichkeit zur Reduzierung der Leistungsaufnahme eines TFT/LC-Display besteht nur darin, die Hintergrundbeleuchtung zu dimmen. Dies macht ein sinnvolles Bedienkonzept notwendig. Alternativ kann die Displayhelligkeit über einen Umgebungslichtsensor geregelt werden.

Das OLED-Display zeigt mit typ. 260 mW ebenfalls einen hohen Leistungsbedarf auf. Jedoch bezieht sich die Angabe auf eine Anzahl gesetzter Pixel von 30 %. Die Leistungsaufnahme bei OLED-Displays ist proportional abhängig von der Anzahl der gesetzten Pixel (vgl. Abschnitt 2.5.3). Die geschätzte maximale Anzahl der gesetzten Pixel dieser Anwendung liegt bei 15 %, da während des Tauchgangs nur Daten und keine Bildinhalte auf dem Display dargestellt werden sollen. Somit reduziert sich die Leistung auf die Hälfte und beträgt somit nur noch 130 mW.

<sup>35</sup> [17] Atmel (2013), Datasheet XMEGA A3, Seite 19.

<sup>36</sup> vgl. [18] Densitron Display (2009), Datasheet C0240QGLA-T - Preliminary Product Specification, Seite 14.

<sup>37</sup> vgl. [19] Displaytech Ltd. (2011), Datasheet INT024BTFT - LCD Module Product Specification, Seite 9.

Darüber hinaus zeigt das OLED-Display mit  $170^\circ$  einen weiten Betrachtungswinkel im Vergleich zu dem TFT/LC-Display. Der weite Betrachtungswinkel ist für die Anwendung ein entscheidendes Kriterium und spricht daher für das OLED-Display.

Die Lebensdauer des OLED-Displays ist mit 20.000 Betriebsstunden angegeben. Dieser Wert bezieht sich auf eine Reduzierung der Displayhelligkeit auf 50 %. Die Applikation stellt keinen Dauerbetrieb dar, weshalb die Lebensdauer von 20.000 Betriebsstunden vollkommen ausreichend ist. Auch die unterschiedliche Alterung der einzelnen Subpixel-farben stellt keine nennenswerte Einschränkung dar, da bei dieser Applikation, wie schon oben aufgeführt, keine Bildinhalte dargestellt werden sollen, sondern sich die Anzeige auf Ausnutzung der Grundfarben beschränkt.

Das Kontrastverhältnis des OLED-Displays zeigt mit 1000 : 1 einen weitaus höheren Wert als der des TFT/LC-Displays, welcher bei 350 : 1 liegt.

Der Vergleich der beiden Technologien zeigt die Vorteile des OLED-Displays auf. Für die Umsetzung des Tauchcomputers ist daher das oben aufgeführte OLED-Display vorgesehen. Die maximal benötigte Leistung des Displays für diese Anwendung wird dabei wie oben begründet auf 130 mW geschätzt.

## 4.2 Untersuchung zum Leistungsbedarf

Dieser Abschnitt beschäftigt sich mit der Untersuchung zum Leistungsbedarf. Um den Leistungsbedarf des Tauchcomputers ermitteln zu können, erfolgt zunächst eine tabellari-sche Auflistung zur Leistungsaufnahme der ausgewählten Komponenten. Damit der Gesamtleistungsbedarf des Tauchcomputers eingeordnet und bewertet werden kann, werden vergleichend die in Kapitel 2 im Rahmen der Marktanalyse angeführten Geräte hinzugezogen. Hierfür werden diese Tauchcomputer hinsichtlich ihrer Leistungsaufnahme untersucht. Die eigene Entwicklung setzt ähnliche Hardwarekomponenten ein, weshalb das Hinzuziehen einer solchen Untersuchung eine sinnvolle Methode zur Bewertung des Leistungsbedarfs darstellt. Damit bildet dieser Abschnitt die Grundlage zur Auswahl eines geeigneten Akkumulators.

### 4.2.1 Leistungsaufnahme der ausgewählten Komponenten

In der nachfolgenden Tabelle 3 sind die vorgesehenen Komponenten aufgeführt. Die USB-Schnittstelle befindet sich während des Tauchgangs nicht im Betrieb, weshalb sie nicht in die Betrachtung aufgenommen werden muss. Die eingesetzten Sauerstoffsensoren benötigen zur Erzeugung eines Ausgangssignals keine Versorgungsspannung, da sie nach dem Prinzip einer galvanischen Zelle funktionieren. Aus diesem Grund fällt auch die Messung des Sauerstoffpartialdrucks aus der Betrachtung heraus.

| Komponenten                                  | Konditionen  | Strom-<br>aufnahme | Leistungs-<br>aufnahme |
|--|--|--------------------|------------------------|
| Drucksensor - MS5803-30BA <sup>38</sup>      | Vcc = 3 V, OSR = 256   | 0,9 µA             | 0,027 mW               |
| Mikrocontroller - ATxmega192A3 <sup>39</sup> | Vcc = 3 V, Systemtakt 16 MHz   | ca. 8,5 mA         | 25,5 mW                |
| Real Time Clock - DS1339 <sup>40</sup>       | Vcc = 3 V, 400 kHz   | ca. 110 µA         | 0,33 mW                |
| OLED-Display – C0240QGLA-T <sup>41</sup>     | 15 % Pixel on, IO-Vcc = 1,65 ~ 3,3 V<br>AR-VDD = 4,6 V, AR-VSS= -4,6 V | -                  | 130 mW                 |

**Tabelle 3: Leistungsaufnahme ausgewählter Komponenten**

Die in der Tabelle aufgeführten Daten sind in den Datenblättern der jeweiligen Komponente zu finden. Die Gesamtleistungsaufnahme der Komponenten liegt bei ca. 156 mW.

#### 4.2.2 Leistungsaufnahme von Tauchcomputern

Die nachfolgende Tabelle 4 listet die in der Marktanalyse betrachteten Tauchcomputer auf. Dazu sind die eingesetzten Batterien und die zugehörige angegebene Laufzeit des jeweiligen Tauchcomputers aufgeführt. Zu dem Tauchcomputer DR5 gibt es keine Angabe zum verbauten Akkumulator, weshalb er daher in diese Betrachtung nicht mit einbezogen werden kann.

| Tauchcomputer | Laufzeit | Batterie     | Spannung | Kapazität | max. empfohlener<br>Dauerstrom | Leistung |
|---------------|----------|--------------|----------|-----------|--------------------------------|----------|
| Petrel        | 90 Std   | Saft LS14500 | 3,6 V    | 2600 mAh  | 70 mA                          | 104 mW   |
| Predator      | 90 Std   | Saft LS14500 | 3,6 V    | 2600 mAh  | 70 mA                          | 104 mW   |
| OSTC 3        | 60 Std   | Saft LS14500 | 3,6 V    | 2600 mAh  | 70 mA                          | 156 mW   |

**Tabelle 4: Laufzeit Leistungsaufnahme von Tauchcomputern <sup>42 43</sup>**

Der Tauchcomputer OSTC 3 besitzt eine Leistungsaufnahme von 156 mW. Die Angaben der Laufzeit der Tauchcomputer Predator und Petrel beziehen sich, wie in der Marktana-

<sup>38</sup> vgl. [16] Measurement Specialties TM (2012), Datasheet MS5803-30BA Miniature 30 bar Module, Seite 2.

<sup>39</sup> vgl. [17] Atmel (2013), Datasheet XMEGA A3, Seite 72.

<sup>40</sup> vgl. [26] Maxim (2011), Datasheet RTC DS1339, I2C Serial Real Time Clock, Seite 7.

<sup>41</sup> vgl. [18] Densitron Display (2009), Datasheet C0240QGLA-T - Preliminary Product Specification, Seite 14.

<sup>42</sup> vgl. Tabelle 1 Abschnitt 2.1, Seite 6.

<sup>43</sup> vgl. [20] Saft Specialty Battery Group (2009), Datenblatt Primary Lithium Battery LS 14500, Seite 1.



lyse bereits dargestellt, auf einen Betrieb des Tauchcomputers mit gedimmten Display. Daher weisen die Laufzeiten und die Leistungsaufnahmen der Tauchcomputer gegenüber dem OSTC eine große Differenz auf. Für die folgende Bewertung wird daher die Leistungsaufnahme des OSTC 3 mit 156 mW zum Vergleich herangezogen.

### 4.2.3 Bewertung des Leistungsbedarfs

Die Betrachtung zum Leistungsbedarf der eingesetzten Komponenten aus Abschnitt 4.2.1 hat ergeben, dass der Tauchcomputer im Betrieb mit den ausgewählten Komponenten eine Leistungsaufnahme von ca. 156 mW benötigt. Aus der Tabelle 3 ist zu entnehmen, dass das Display mit 130 mW den größten Anteil an der Gesamtleistungsaufnahme hat. Der Mikrocontroller stellt mit 25,5 mW eine verhältnismäßig kleine, aber dennoch nicht zu vernachlässigende Größe dar. Über die Einstellung der Taktfrequenz des Mikrocontrollers kann die Leistungsaufnahme noch beeinflusst werden. Die restlichen Komponenten, wie die RTC als auch die Drucksensoren haben einen vernachlässigbaren kleinen Anteil an der Gesamtleistungsaufnahme des Systems.

Die Untersuchung zum Leistungsbedarf aus Abschnitt 4.2.2 kommt zu dem Ergebnis, dass der Tauchcomputer OSTC 3 eine Leistungsaufnahme von rechnerisch 156 mW benötigt. Die beiden Systeme weisen damit den gleichen Energiebedarf auf.

Als Fazit der Betrachtung der Leistungsaufnahme kann damit festgehalten werden, dass die ausgewählten Komponenten einen Gesamtleistungsbedarf besitzen, die eine realistische Umsetzung des Systemkonzepts möglich machen. Für die weiteren Betrachtungen wird von einem Leistungsbedarf von 160 mW ausgegangen.

## 4.3 Auswahl des Akkumulators

Die Laufzeit des Tauchcomputers ist laut Aufgabenstellung mit 20 Stunden vorgegeben. In dem Tauchcomputer sollen Akkumulatoren eingesetzt werden. Hierfür kommen die in Kapitel 2 aufgeführten Ni-MH-Akkumulatoren oder Li-Ion-Akkumulatoren in Betracht. Die nachfolgende Tabelle zeigt vergleichend auf, welche Laufzeit mit den Akkumulatoren erzielt werden kann. Beide Akkumulatoren besitzen eine Baugröße, die sich laut Auftraggeber in das Gehäuse des Tauchcomputers integrieren lassen.

| Akkumulator        | Spannung | Kapazität | Gewicht | Maße                 | Laufzeit bei 160 mW |
|--------------------|----------|-----------|---------|----------------------|---------------------|
| Ni-MH<br>AA-Size   | 1,2 V    | 2000 mA   | 29 g    | Ø 14,5 mm x 50 mm    | 15 Std              |
| Li-Ion<br>UR18500H | 3,7 V    | 1450 mA   | 30,5 g  | Ø 17,65 mm x 49,2 mm | 33,53 Std           |

**Tabelle 5: Gegenüberstellung von Akkumulatoren zur Laufzeitbestimmung** <sup>44 45</sup>

Die Tabelle 5 verdeutlicht, dass eine Versorgung des Tauchcomputers über einen Ni-MH-Akkumulator bei einer Leistungsaufnahme von 160 mW die geforderte Laufzeit von 20 Stunden nicht realisieren kann. Es ist daher notwendig den Betrieb über mindestens zwei in Reihe geschaltete Akkumulatoren umzusetzen. Ein komfortables Schnellladen von zwei Zellen zieht, wie in Kapitel 2 beschrieben, auch eine Temperaturüberwachung jeder Zelle nach sich, um ein sicheres Laden zu gewährleisten. Zudem kann bei Einsatz zweier unterschiedlich geladener Zellen die Laufzeit nach dem Laden nicht garantiert werden, da die Möglichkeit besteht, dass die Zellen unterschiedliche Ladezustände nach dem Laden erreichen und damit die notwendige Gesamtkapazität für einen Betrieb von 20 Stunden nicht bereitsteht. Ein weiterer kritischer Aspekt stellt die Größe des Akkumulators dar, da dieser zwangsläufig aus zwei Zellen bestehen muss und daher einen großen Bauraum einnimmt.

Tabelle 5 zeigt auf, dass eine Versorgung über den Li-Ion-Akkumulator und einer Leistungsaufnahme von 160 mW des Tauchcomputers einen Betrieb des Systems von über 33 Stunden ermöglicht. Damit kann die geforderte Laufzeit von 20 Stunden eingehalten werden. Li-Ion-Akkumulatoren besitzen eine hohe Energiedichte. Die Umsetzung mittels eines Li-Ion-Akkumulators weist im Vergleich zur Umsetzung mit Ni-MH-Akkumulatoren nur ca. die Hälfte des Gewichtes bei gleicher Laufzeit auf. Auch die Abmaße sprechen angesichts der notwendigen Umsetzung über zwei Ni-MH-Akkumulatoren für den Li-Ion-Akkumulator. Für die Versorgung des Systems wurde daher der oben aufgeführte Li-Ion-Akkumulator vom Typ UR18500H ausgewählt.

## 4.4 Blockschaftplan des Systemkonzepts

Die folgende Abbildung 19 zeigt den Blockschaftplan zum aufgestellten Systemkonzept. Der Mikrocontroller bildet dabei das Herzstück des Tauchcomputers. An ihm sind alle Komponenten angeschlossen. Das System zeigt die geforderte Redundanz der Drucksensoren. Die Messung des Sauerstoffpartialdrucks erfolgt über den internen 12-Bit A/D-Wandler des Mikrocontrollers. Um die Messung der Tauchzeit sowie die Anzeige von Da-

<sup>44</sup> vgl. [9] Panasonic (2001), Ni-MH Handbook, Seite 6.

<sup>45</sup> vgl. [21] Panasonic (2012), Datasheet - Lithium Ion UR18500H, Seite 1.

tum und Uhrzeit umsetzen zu können, sieht das aufgestellte Systemkonzept eine extern angeschlossene RTC vor. Diese wird über eine Batterie gepuffert, um bei einem Wechsel des Akkumulators Datum und Uhrzeit nicht erneut einstellen zu müssen. Ferner verfügt das System über eine USB-Schnittstelle, wodurch eine Kommunikation mit dem PC ermöglicht wird. Diese USB-Schnittstelle dient darüber hinaus dem Laden des Akkumulators. Der Tauchcomputer wird über den vorgesehenen Li-Ion Akkumulator versorgt.

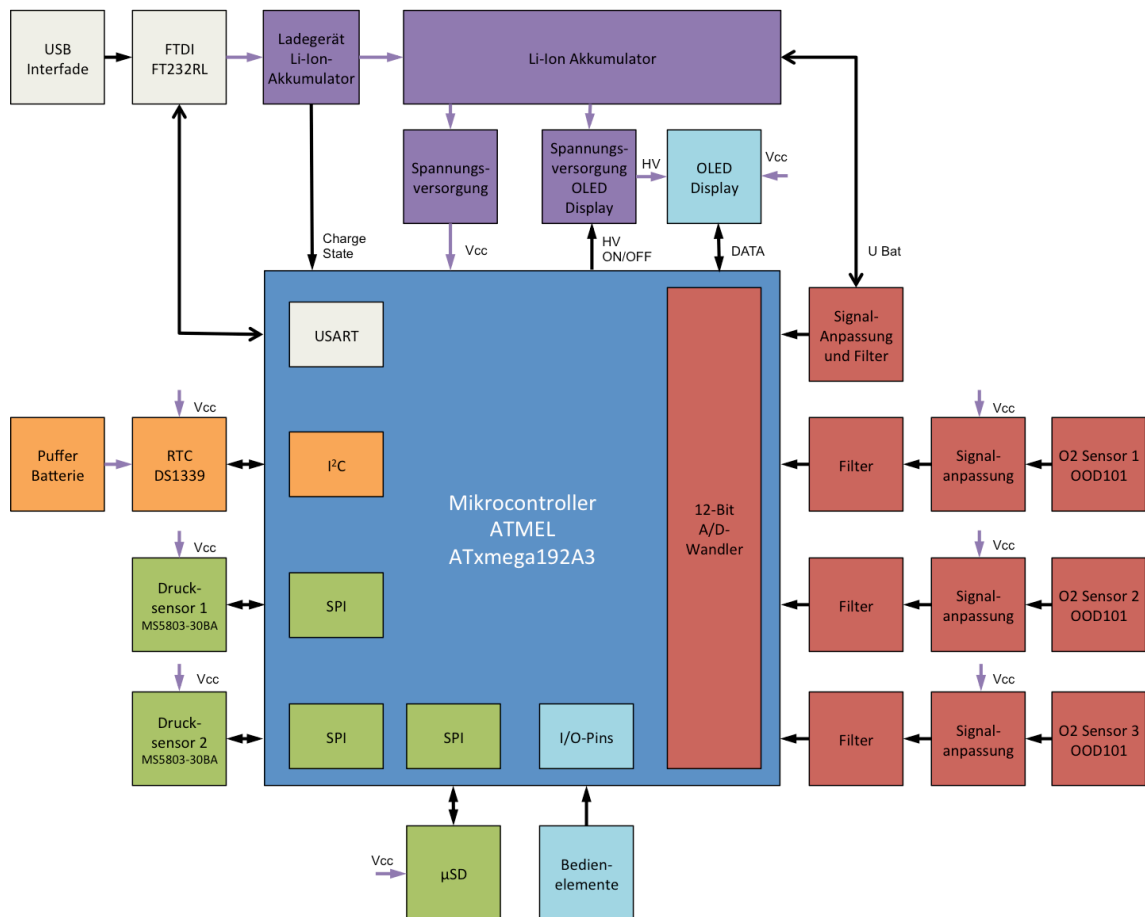


Abbildung 19: Blockschaftplan des Systemkonzepts



## 5 Realisierung des Systemkonzepts

Dieses Kapitel befasst sich mit der Realisierung des Systemkonzepts, welches im vorangegangenen Kapitel in einem Blockschaltplan dargestellt wurde. Es zeigt sowohl die Auslegung und die Umsetzung der Spannungsversorgung als auch die Realisierung der Ladeschaltung des Akkumulators und den Tiefentladeschutz. Weiterführend wird der Aufbau des Messsystems für die galvanischen Sauerstoffsensoren erläutert.

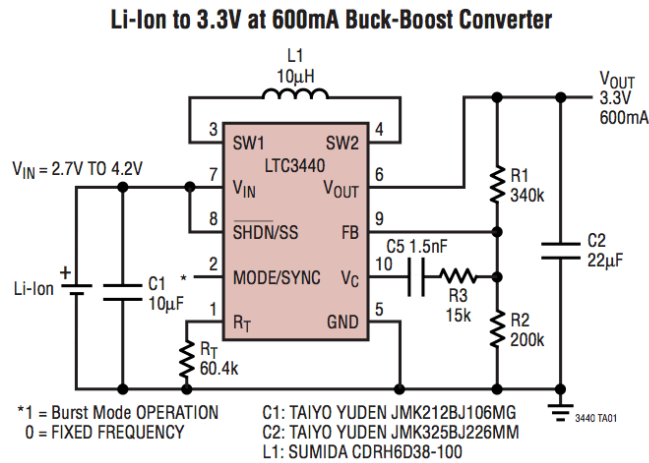
### 5.1 Realisierung der Spannungsversorgung

Die Spannungsversorgung des Tauchcomputers soll, wie im Systemkonzept festgelegt, über einen Li-Ion Akkumulator erfolgen. Um dem Tauchcomputer eine konstante Spannungsversorgung bereitzustellen, die zudem möglichst effizient arbeitet, ist es zweckmäßig hierfür einen Schaltregler einzusetzen. Die Ausgangsspannung des Schaltreglers ist auf alle verbauten Komponenten des Tauchcomputers abzustimmen. Die nachfolgende Tabelle 6 zeigt die Versorgungsspannungsbereiche der eingesetzten Komponenten, die in den Datenblättern der Hersteller angegeben sind:

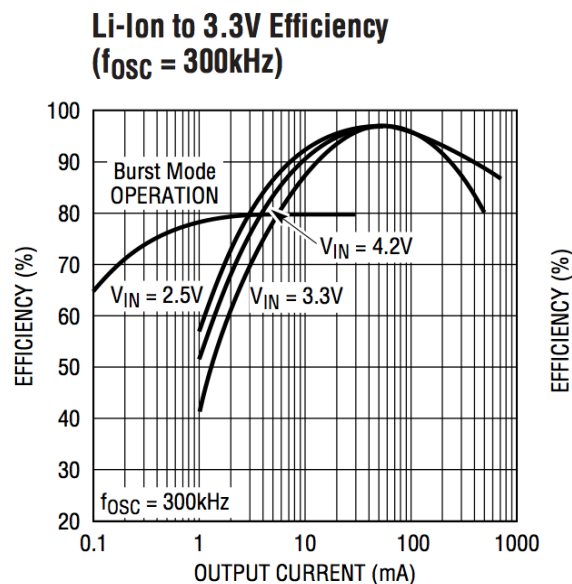
| Komponenten                              | min. Vcc | max. Vcc |
|--|----------|----------|
| Mikrocontroller ATxmgea192A3             | 1,6 V    | 3,6 V    |
| Drucksensoren MS5803-30BA                | 1,8 V    | 3,6 V    |
| OLED-Display C0240QGLT                   | 2,5 V    | 3,3 V    |
| Real Time Clock DS1339-3                 | 2,7 V    | 5,5 V    |
| Mikro-SD-Card                            | 2,7 V    | 3,6 V    |
| USB to Serial Data Transfer IC - FT232RL | 1,8 V    | 5,5 V    |

**Tabelle 6: Versorgungsspannungsbereiche eingesetzter Hardware**

Die Entscheidung für die Realisierung der Spannungsversorgung fiel auf einen Schaltregler mit einer Ausgangsspannung von 3 V. Dazu wurde ein Schaltregler vom Typ LTC3440 ausgewählt. Über den Spannungsteiler (R1 und R2) wird die Ausgangsspannung des Schaltreglers eingestellt. Die folgende Abbildung 20 zeigt den Aufbau des Schaltreglers für eine Spannung von 3,3 V. Dieser Aufbau wurde mit angepasster Ausgangsspannung für den Tauchcomputer übernommen.

Abbildung 20: Aufbau Schaltregler - LTC3440 <sup>46</sup>

Neben der Ausgangsspannung des Schaltreglers ist auch der Wirkungsgrad für die Auslegung von mobilen Applikationen von hoher Bedeutung. Die folgende Abbildung 21 zeigt den Wirkungsgrad des eingesetzten Schaltreglers bei einer Ausgangsspannung von 3,3 V und einer Oszillatorfrequenz von 300kHz. Es ist zu sehen, dass dieser in dem für die Anwendung relevanten Bereich beinahe unabhängig von der Eingangsspannung mit einem Wirkungsgrad von über 90 % arbeitet

Abbildung 21 Kennlinie Wirkungsgrad - LTC3440 <sup>47</sup>

<sup>46</sup> [22] Linear Technology (2001), Datasheet LTC3440, Seite 1.

<sup>47</sup> [22] Linear Technology (2001), Datasheet LTC3440, Seite 3.

## 5.2 Spannungsversorgung des OLED Displays

Im Systemkonzept wurde festgelegt, dass für die Anzeige ein OLED-Display vom Typ C0240QGLA-T der Firma Densitron eingesetzt werden soll. Dieses OLED-Display benötigt neben der Versorgungsspannung für den integrierten Displaycontroller von 3 V auch eine positive Spannung von 4,6 V und eine negative Spannung von -4,4 V. Um diese Spannungen zu erzeugen, wurde ein Spannungsregler mit zwei Ausgangskanälen eingesetzt. Der Schaltregler ermöglicht über die beiden Kanäle den Aufbau eines Step-Up-Wandlers für die positive Spannungsversorgung von 4,6 V sowie den Aufbau eines Inverters für die negative Spannungsversorgung von -4,4 V.

Der Schaltregler arbeitet auf einer festen hohen Frequenz von 1,2 MHz und erlaubt daher einen platzsparenden Aufbau, da kleine Induktivitäten bzw. Kondensatoren genutzt werden können. Er ist in einem Gehäuse mit den Abmaßen von 3 x 3 mm untergebracht und nimmt daher selbst kaum Bauraum ein. Der platzsparende Aufbau ist für die Umsetzung wichtig, da die Platine mit den vorgegebenen Maßen von 43 x 60 mm wenig Platz für die Umsetzung zur Verfügung stellt.

Die folgende Abbildung 22 zeigt den komplexen Aufbau des Zwei-Kanal-Schaltreglers, der die benötigten Spannungen für das Display von 4,6 V und -4,4 V direkt von dem Li-Ion-Akkumulator erzeugt. Der Schaltregler erlaubt einen „Softstart“, der durch die Beschaltung der Enable-Eingänge mit einem RC-Glied (R17 und C28) realisiert werden kann. Er kann zudem über den Enable-Eingang abgeschaltet werden, um bei abgeschaltetem Display seine eigene Stromaufnahme auf  $< 0,1 \mu\text{A}$  abzusenken.

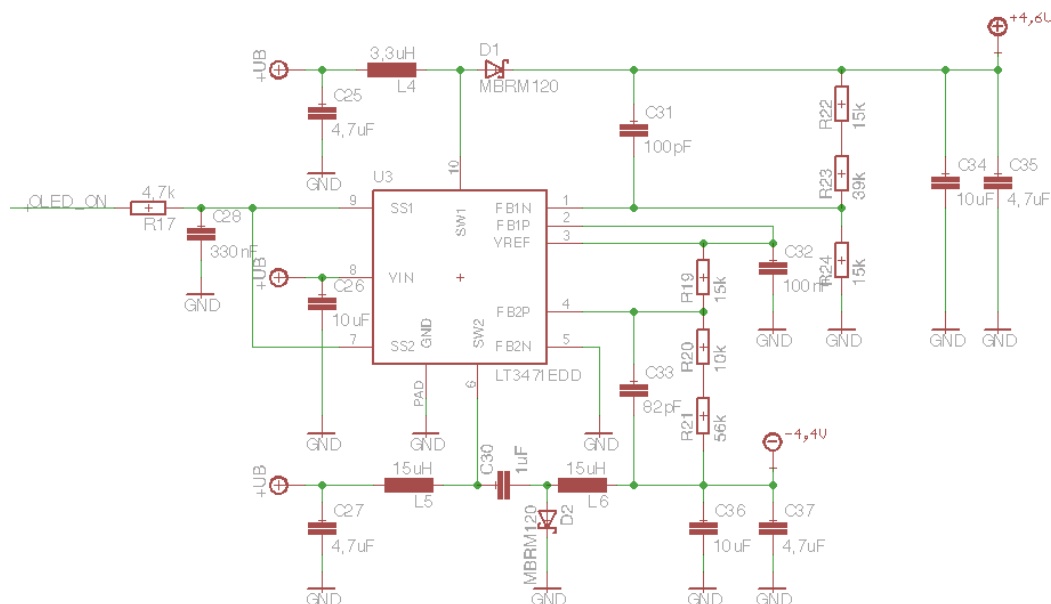


Abbildung 22: Aufbau Spannungsversorgung Display – LT3471

### 5.3 Ladeschaltung und Tiefentladeschutz

Im Systemkonzept ist zur Versorgung des Tauchcomputers ein Li-Ion-Akkumulator vorgesehen. Das Laden des Akkumulators soll über die USB-Schnittstelle erfolgen. Hierfür wurde ein IC des Herstellers Linear Technology vom Typ LTC4054-4.2 ausgewählt. Dieser IC ermöglicht das Laden eines Li-Ion-Akkumulators nach dem CC/CV-Verfahren, wie es im Kapitel 2 bereits beschrieben wurde. Über einen einstellbaren Ladestrom von bis zu 800 mA ermöglicht dieser IC damit das Laden direkt über einen USB-Port. Durch die Beschaltung des ICs mit einem Widerstand kann der Ladestrom eingestellt werden. Der IC besitzt eine interne Überwachung und beendet selbständig den Ladevorgang, wenn der Ladestrom unter 10 % des eingestellten Werts abfällt. Laut Herstellerspezifikation wird die Ladeschlussspannung von 4,2 V auf 1 % genau eingehalten. Dies entspricht  $\pm 42$  mV und übersteigt damit den einzuhaltenden Grenzwert von  $\pm 50$  mV nicht. Die nachfolgende Abbildung 23 zeigt den einfachen Aufbau der Ladeschaltung:

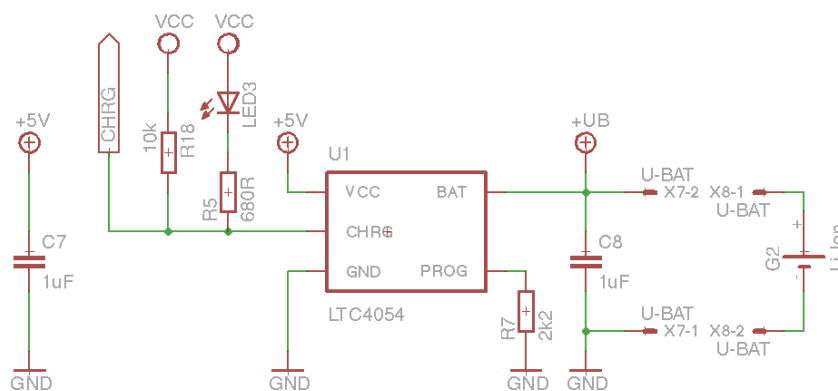


Abbildung 23: Li-Ion Ladegerät - LTC4054

Der Ladestrom wurde für die eigene Anwendung mit einem Widerstand (R7) von 2,2 k $\Omega$  auf einen Ladestrom von 455 mA eingestellt, um die 500 mA, die eine USB 2.0-Schnittstelle bereitstellt, nicht zu überschreiten. Das Laden der Li-Ion Zelle wird bei Unterschreiten von 45,5 mA selbständig beendet.

Die Abbildung 24 veranschaulicht den Ladevorgang eines Li-Ion-Akkumulators mit einer Kapazität von 750 mAh. Es ist zu sehen, dass der Ladestrom hierbei über den Widerstand auf 600 mA eingestellt wurde. Das Laden wird, wie oben beschrieben, bei einer Unterschreitung des eingestellten Ladestroms von 10 % (60 mA) automatisch von dem IC beendet.



### Complete Charge Cycle (750mAh Battery)

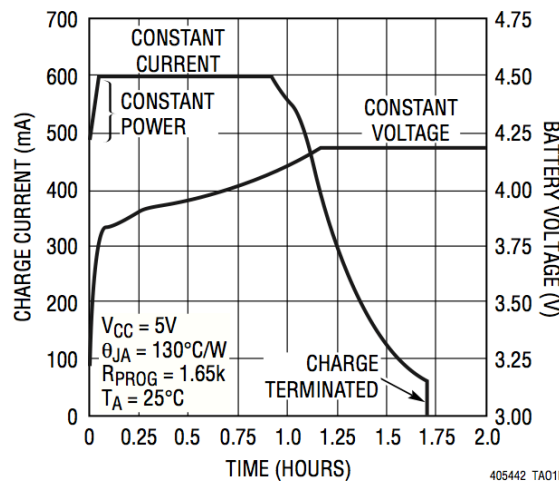


Abbildung 24: Ladezyklus - LTC4054 <sup>48</sup>

Der IC ermöglicht zudem das selbstständige Nachladen des Li-Ion-Akkumulators, wenn die Spannung der Zelle wieder unter einen Wert von 4,05 V absinkt. Über einen Ausgang kann der Zustand des Ladegeräts überwacht werden. Dazu ist der entsprechende Ausgang des ICs, wie in Abbildung 23 zu sehen, auf den Mikrocontroller geführt.

Ebenfalls wird die Spannung des Akkumulators vom Mikrocontroller überwacht, um diesen vor einer Tiefentladung zu schützen. Dies geschieht über einen hochohmigen Spannungsteiler, der auf die Referenzspannung von 2048 mV des A/D-Wandlers dimensioniert wurde. Der Mikrocontroller kann bei drohender Tiefentladung Komponenten, wie das Display abschalten oder diese in einen Standby-Modus versetzen. Überdies kann er, wie bereits vorangegangen beschrieben, seinen Systemtakt absenken und sich in einen Sleep-Modus versetzen. Damit kann der gesamte Leistungsbedarf des Tauchcomputers auf ein Minimum reduziert und somit der Tiefentladeschutz realisiert werden.

## 5.4 Realisierung der Messung der Sauerstoffsensoren

Im Systemkonzept aus Kapitel 4 wurde eine Messung der galvanischen Sauerstoffsensoren über den internen 12 Bit A/D-Wandlers des Mikrocontrollers vorgesehen. Um eine präzise Messung des Sensorsignals zu ermöglichen, ist eine Signalaufbereitung notwendig. Die Umsetzung der Signalaufbereitung wird in Abschnitt 5.6.1 weiterführend erläutert. Des Weiteren stellt eine störungsfreie Spannungsversorgung des A/D-Wandlers einen weiteren wichtigen Aspekt dar, um eine präzise Messung der Sensoren zu erreichen. Die

<sup>48</sup> [23] Linear Technology (2001), Datasheet LTC4054, Seite 1.

Filterung der Spannungsversorgung von den restlichen Störeinflüssen durch die Schaltung wird in Abschnitt 5.6.2 erläutert.

### 5.4.1 Signalaufbereitung der Messung

Die folgende Abbildung 25 zeigt den Aufbau der Messschaltung für die Sauerstoffsensoren. Umgesetzt wurde die Messschaltung nach dem klassischen Aufbau einer Signalaufbereitungskette bei der Erfassung analoger Signale. Solch eine Messkette besteht aus den zwei wesentlichen Komponenten der Signalanpassung und der Signalfilterung. Diese sollen hier weitführend betrachtet werden.

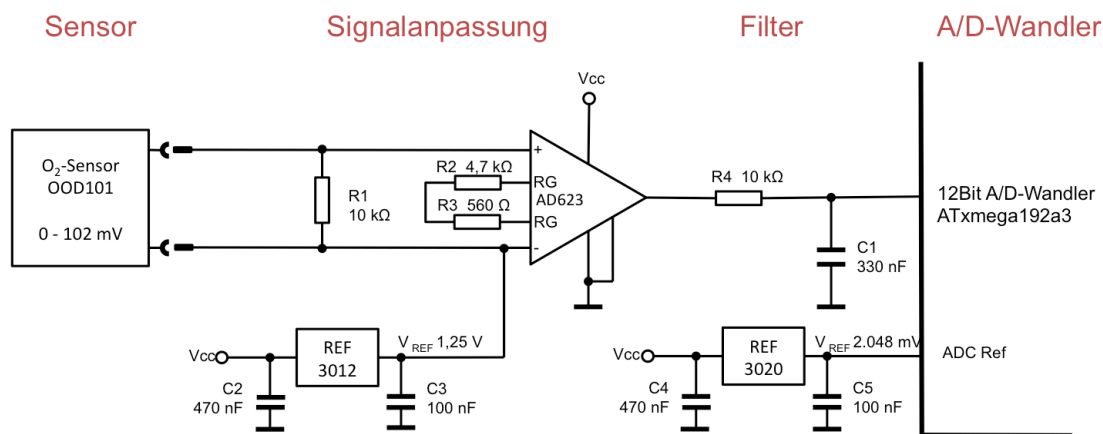


Abbildung 25: Messschaltung Sauerstoffmessung

#### Signalanpassung

Laut Hersteller des galvanischen Sauerstoffsensors ist zur Belastung ein Widerstand von 10 kΩ vorgesehen. Der Widerstand R1 stellt in der Abbildung 25 diesen Lastwiderstand dar. Der Instrumentenverstärker bildet das Glied der Signalanpassung. Über den Instrumentenverstärker werden sowohl die notwendige Impedanzwandlung als auch die Verstärkung des Messsignals erzielt. Die Verstärkung ist über die Widerstände R2 und R3 auf einen Verstärkungsfaktor von ca. 20 eingestellt. Damit steuert das Ausgangssignal eines neuen Sensors bei einem Sauerstoffpartialdruck von 1,65 bar den gesamten Messbereich des A/D-Wandlers aus. Die Referenzspannung des A/D-Wandlers beträgt 2.048 mV und wurde über einen extern angeschlossenen Referenzspannungs-IC realisiert. Ein alter Sensor steuert noch über die Hälfte des Messbereichs des A/D-Wandlers aus. Die folgende Abbildung 26 zeigt das Ausgangssignal des Instrumentenverstärkers für verschieden gealterte Sauerstoffsensoren über den vorgegebenen Messbereich von 0,21 bis 1,65 bar. Die Abbildung zeigt außerdem, dass eine gute Aussteuerung des Messbereichs erreicht werden konnte.

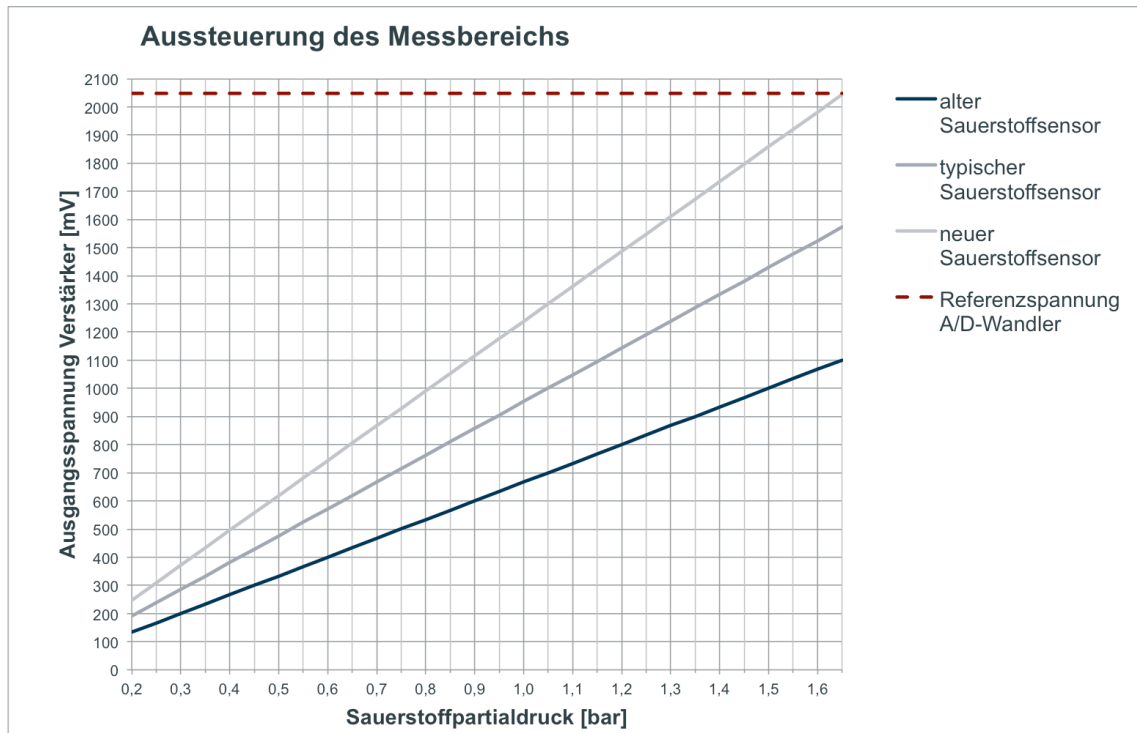


Abbildung 26: Aussteuerung des Messbereichs

### Signalfilterung

Die Messung des Sauerstoffpartialdrucks stellt, wie in Kapitel 2 beschrieben, ein träges System dar. Dadurch kann die Filterung des Messsignals über einen einfachen RC-Tiefpassfilter erster Ordnung realisiert werden. Die Abbildung 27 zeigt den Amplitudengang des eingesetzten Filters. Die Signale werden vom A/D-Wandler im Mikrocontroller mit einer Samplefrequenz von  $> 8\text{kHz}$  abgetastet. Somit wurde das Abtasttheorem eingehalten. Dies besagt, dass Störsignale, die oberhalb der Hälfte der Abtastfrequenz liegen, nicht mehr digital gefiltert werden können. Rauschende Störungen, die unter  $4\text{kHz}$  auftreten, können per Software somit bei Bedarf digital gefiltert werden.

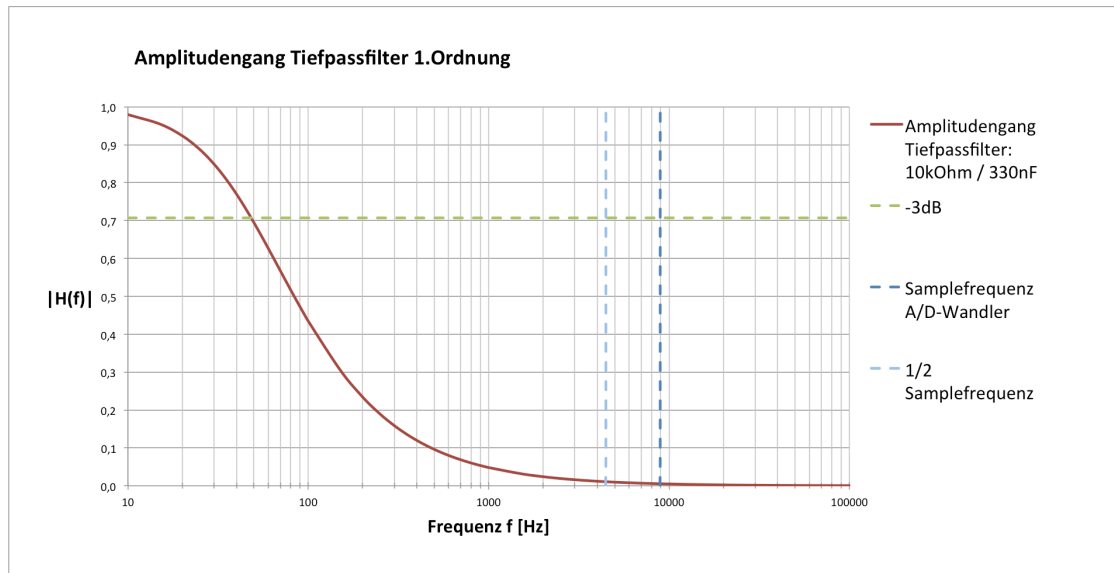


Abbildung 27: Amplitudengang Tiefpassfilter 1. Ordnung

In Abbildung 27 wird das zugehörige Zeitverhalten des Filters dargestellt. Das Filter besitzt eine Zeitkonstante von 330  $\mu\text{s}$ . Damit ist das eingesetzte Filter für das träge Sensor-signal schnell genug.

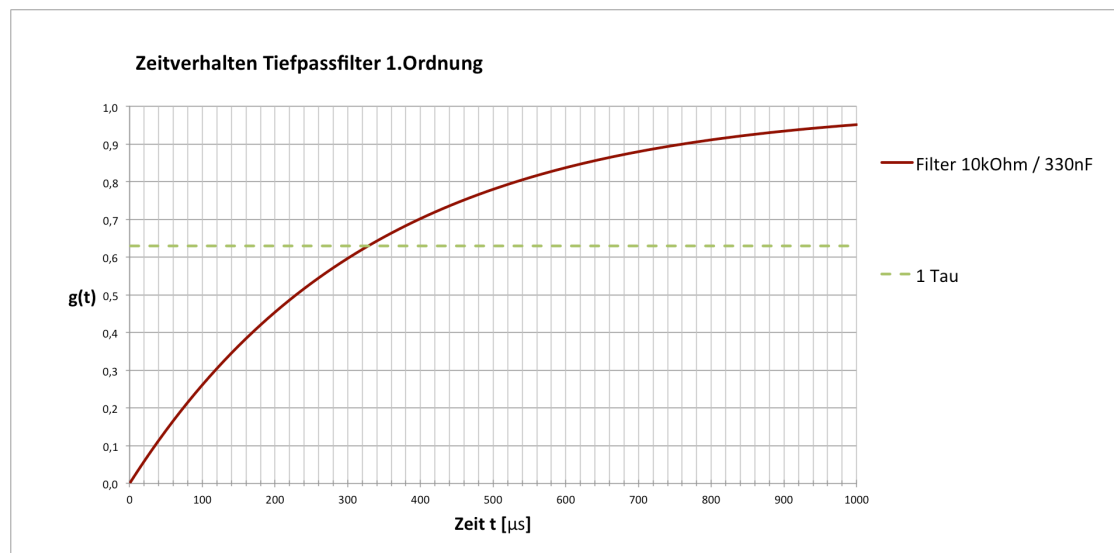


Abbildung 28: Zeitverhalten Tiefpass 1. Ordnung

### 5.4.2 Glättung der analogen Versorgungsspannung

Um dem A/D-Wandler eine störungsfreie Spannungsversorgung zu generieren, wurde ein Tiefpassfilter zweiter Ordnung vorgesehen. Dieser Tiefpassfilter soll die folgenden möglichen Störeinflüsse der Schaltung herausfiltern:

- Schaltregler Spannungsversorgung 3 V : 300 kHz
- Schaltregler Spannungsversorgung OLED-Display: 1,2 MHz
- Taktfrequenz des Mikrocontrollers: 1 – 16 MHz

Um das Filter auslegen zu können, bedarf es einer Systembetrachtung. Der Amplitudengang des Systems gibt Aufschluss über die Filterung der Störeinflüsse durch die Schaltung, deren Frequenzen oben aufgeführt wurden. Die Abbildung 29 stellt das betrachtete System eines LC-Tiefpassfilters 2. Ordnung mit einem Widerstand zur Dämpfung des schwingungsfähigen Systems dar:

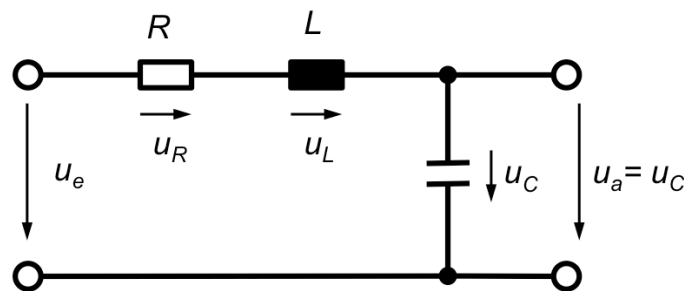


Abbildung 29: System - Tiefpass 2. Ordnung

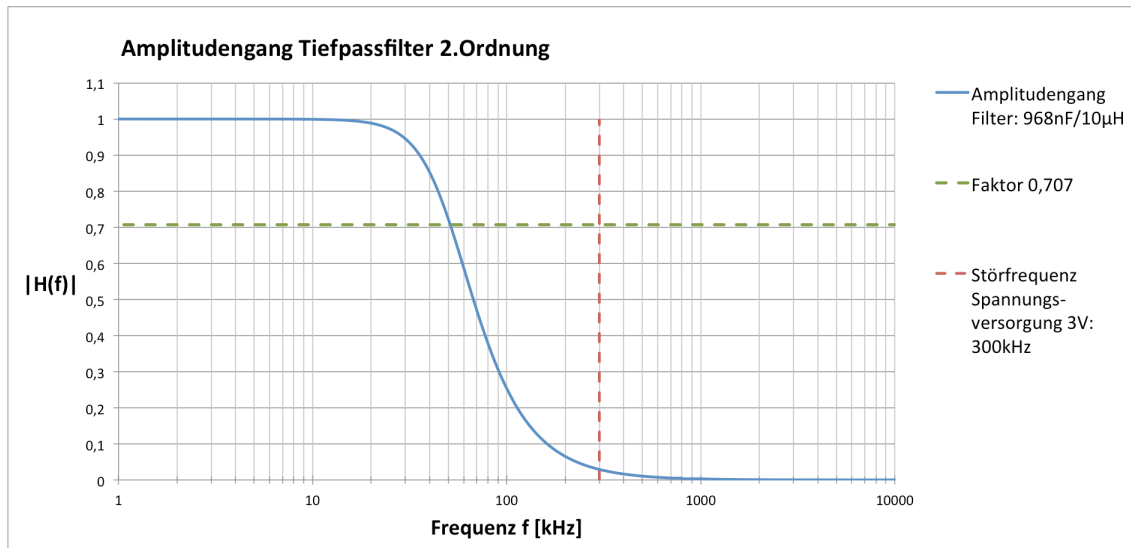
Die Betragsübertragungsfunktion eines LC-Tiefpassfilters zweiter Ordnung wird mit der folgenden Formel beschrieben:

$$|H(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^4 + (D^2 - 2) \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 + 1}}$$

$$\text{mit: } D = \frac{1}{Q} = R \cdot \sqrt{\frac{C}{L}} \quad , \quad \omega_g = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad 49$$

In der Abbildung 30 ist der Amplitudengang des eingesetzten Filters dargestellt. Die Kapazität des Filters beträgt 968 nF und wurde über die Parallelschaltung von drei Keramik-kondensatoren realisiert. Die Induktivität besitzt einen Wert von 10 µH. Hinsichtlich des Amplitudengangs erfolgt die Darstellung unter Betrachtung des Filters bei einer optimalen Dämpfung ( $D = \sqrt{2}$ ):

<sup>49</sup> [24] Universität Kiel (2013), Elektronische Filter, Seite 3 f.



**Abbildung 30: Amplitudengang Tiefpassfilter 2. Ordnung**

Der Amplitudengang des Filters zeigt, dass die oben aufgeführten Störfrequenzen durch die Schaltung genügend gefiltert werden. Die Berechnung des Widerstands zur optimalen Dämpfung des Systems ergab, dass dieser mit  $4,54 \, \Omega$  einen vernachlässigbaren kleinen Wert besitzt:

$$R = \frac{D}{\sqrt{\frac{C}{L}}} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\frac{968nF}{10\mu H}}} = 4,545\Omega$$

## 5.5 Realisierung des Tauchcomputers

Die Abbildung 31 zeigt die im Rahmen dieser Arbeit konstruierte Platine des Tauchcomputers. Sie hat die Abmaße  $43 \times 60 \, \text{mm}$  und hält damit die vorgegebene Größe ein. In der Abbildung sind die redundant ausgeführten Anschlüsse der Drucksensoren dargestellt. Diese wurden aufgrund der direkten Druckeinwirkung auf eine separate Platine ausgelagert.

Die Schaltpläne der Platinen befinden sich im Anhang. Zudem sind die Konstruktionsdaten auf der beigefügten CD einsehbar. Zur Konstruktion der Platine wurde das Programm CadSoft Eagle v. 6.4 genutzt.<sup>50</sup>

<sup>50</sup> [25] CadSoft Eagle (2013), <http://www.cadsoftusa.com>

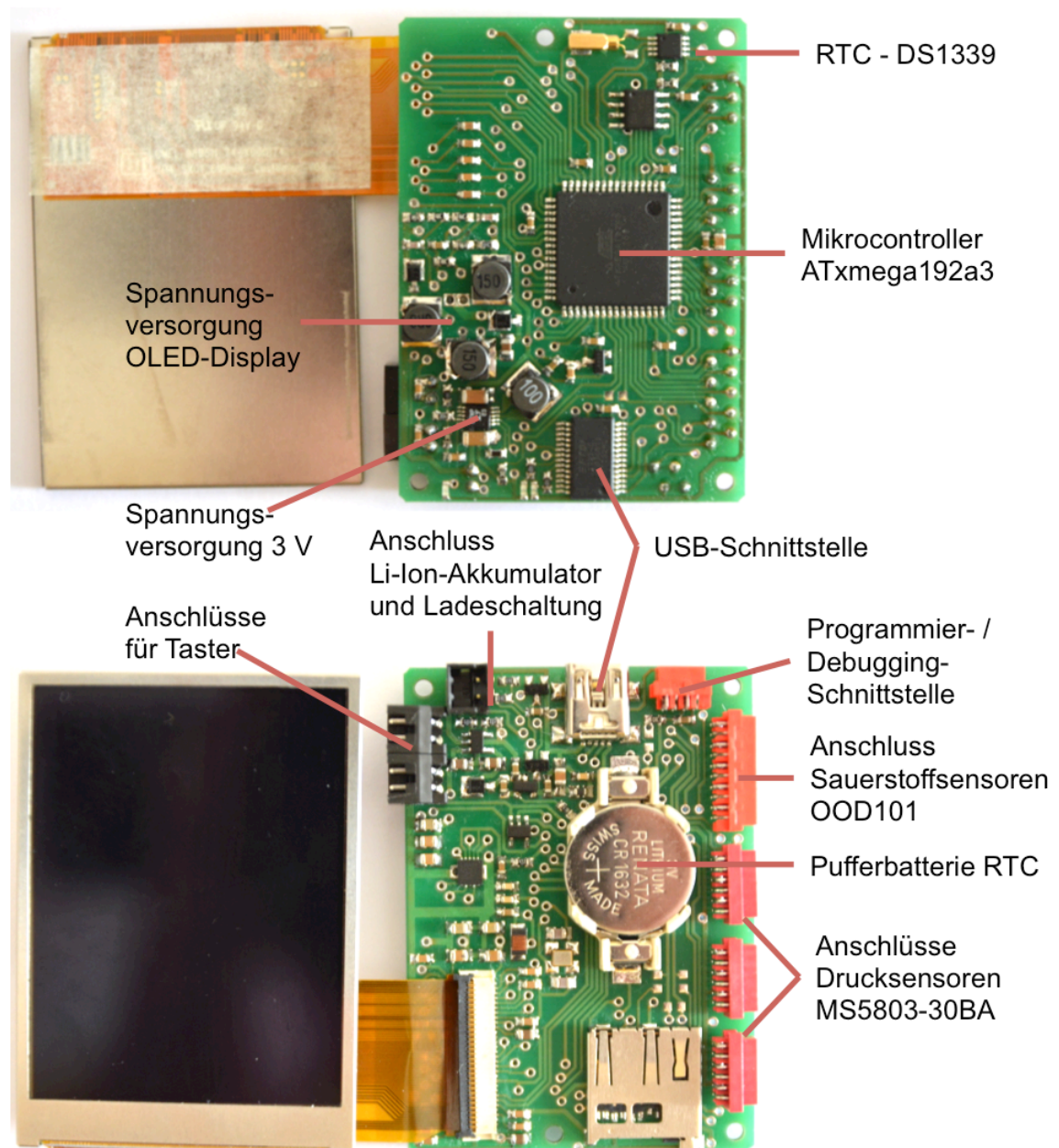


Abbildung 31: Platine des Tauchcomputers





## 6 Systemtest

Dieses Kapitel erläutert zunächst die für den Systemtest entwickelte Software. Die Software umfasst die in Kapitel 3 gewünschten Grundfunktionalitäten und ermöglicht damit einen Systemtest. Mithilfe der Software können Untersuchungen zur Laufzeit und zur Leistungsaufnahme sowohl im Betrieb als auch im Standby-Modus durchgeführt werden. Des Weiteren ermöglicht diese die experimentelle Überprüfung der angeschlossenen Druck- und Sauerstoffsensoren. Auch die Messgenauigkeit für verschieden gealterte Sauerstoffsensoren kann mithilfe des Betriebssystems bestimmt werden. Die Ergebnisse dieses Systemtests stellen damit im Wesentlichen die Grundlage für die Bewertung der Ergebnisse dieser Arbeit dar, die im abschließenden Kapitel erfolgt.

### 6.1 Aufbau der Testsoftware

Um die Funktionen des Tauchcomputers zu überprüfen, wurde ein Betriebssystem entwickelt. Dieses umfasst einen Oberflächen- und einen Tauchmodus, die im Folgenden hinsichtlich ihrer Funktionalität erläutert werden:

#### 6.1.1 Oberflächen- / Konfigurationsmodus

Der Oberflächenmodus dient primär der Konfiguration und der Kalibrierung des Tauchcomputers. Er zeigt das Datum, die Uhrzeit und die Batteriespannung sowie den Ladestatus an. Weiterhin gibt dieser Modus den gemessenen Umgebungsdruck und die Temperatur des Drucksensors auf dem Display aus. Auch die Messdaten der Sauerstoffsensoren zeigt das Display an. Die Ausgabe erfolgt in der Ausgangsspannung der Sauerstoffsensoren und dem zugehörigen Sauerstoffpartialdrucks. In der nachfolgenden Abbildung 32 ist eine Displayaufnahme in diesem Modus zu sehen.

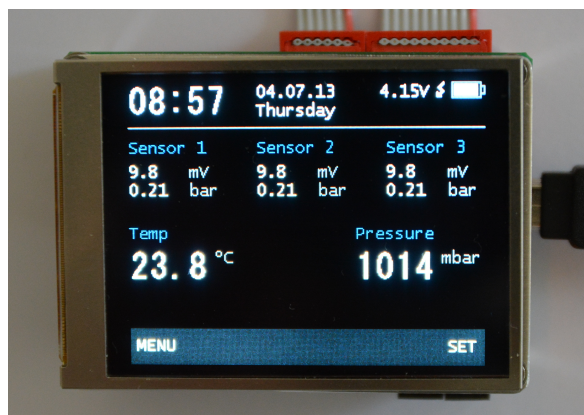


Abbildung 32: Oberflächen- / Konfigurationsmodus des Tauchcomputers

Der Modus erlaubt das Einstellen von Datum bzw. Uhrzeit und die Kalibrierung der Sauerstoffsensoren über zwei Taster. Durch Betätigen des Menü-Taster erfolgt das Durchschalten im Menü. Die Ausgabe des momentan zu konfigurierenden Wertes wird blinkend auf dem Display ausgegeben. Über das Betätigen des zweiten Tasters wird das eigentliche Einstellen bzw. Kalibrieren des jeweiligen Sauerstoffsensors geregelt. Das Kalibrieren erfolgt dabei unter reinem Sauerstoff, was einem Partialdruck von 1 bar entspricht. Laut Herstellerangaben beträgt beim Kalibrieren unter 100 % reinem Sauerstoff die Abweichung des Ausgangssignal  $< 1\%$  und ist damit genau genug. Die nachfolgende Abbildung 33 zeigt die beschriebene Menüführung in diesem Modus.

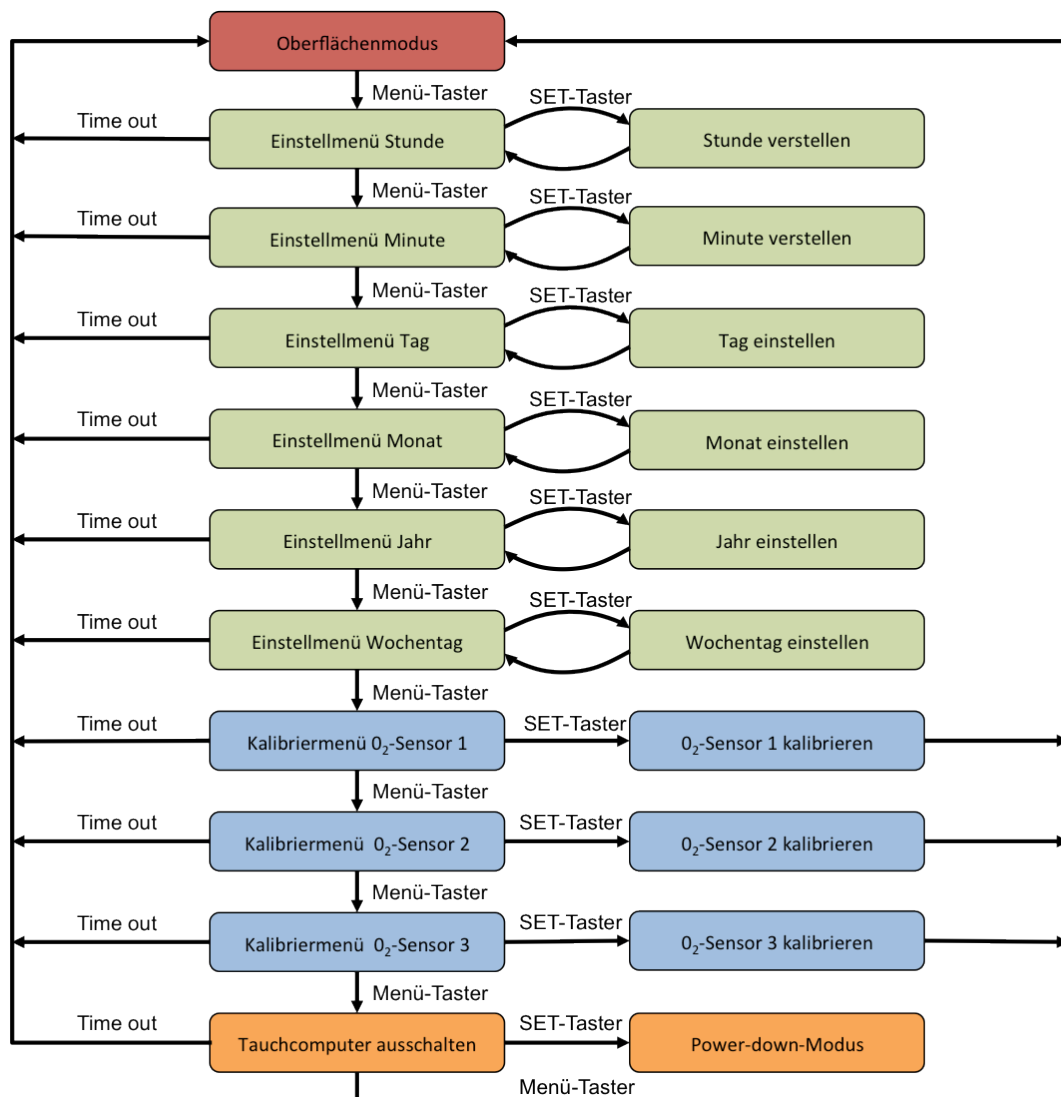


Abbildung 33: Konfigurationsmenü im Oberflächenmodus

### 6.1.2 Tauchmodus

Der Tauchmodus dient ausschließlich der Anzeige der wesentlichen Daten während des Tauchgangs. Eine Konfiguration des Tauchcomputers ist in diesem Modus nicht möglich. Hier erfolgt die Ausgabe der aktuellen und der maximal erreichten Tauchtiefe sowie der Tauchzeit in Stunden und Minuten. Darüber hinaus wird der Sauerstoffpartialdruck der drei Sensoren auf dem Display angezeigt. Auch das Datum, die Uhrzeit sowie die Temperatur werden auf dem Display ausgegeben. In der folgenden Abbildung 34 ist das Display in diesem Modus zu sehen.

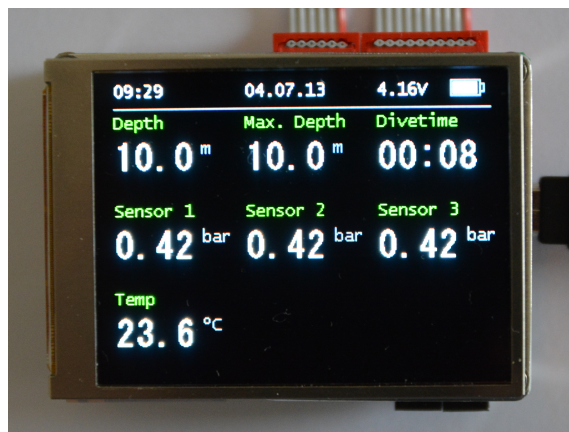


Abbildung 34: Tauchmodus des Tauchcomputers

Das Betriebssystem realisiert ein automatisches Umschalten zwischen dem Tauch- und Oberflächenmodus. Diese Automatik erfolgt über die Umgebungsdruckmessung. Steigt der gemessene Druck auf über 1,25 bar absolut an, was einer Tauchtiefe von 2,5 m entspricht, so wechselt der Tauchcomputer vom Oberflächenmodus automatisch in den Tauchmodus. Um ein ständiges Umschalten zu unterbinden, wurde eine Hysterese in die Software implementiert. Das Umschalten zurück in den Oberflächenmodus erfolgt bei einem Druck von  $\leq 1,1$  bar absolut. Dies entspricht einer Tauchtiefe von 1 m.

### 6.1.3 Test der USB-Schnittstelle

Der derzeitige Stand des oben beschriebenen Betriebssystems bietet momentan noch keine Möglichkeit zum Test der Kommunikation der im Tauchcomputer integrierten USB-Schnittstelle. Um die Funktion der USB-Schnittstelle, wie in der Aufgabenstellung gefordert, zu überprüfen, wurde mittels eines einfachen Programms die Kommunikationsfähigkeit der Schnittstelle kontrolliert. Hierzu wurde an den Tauchcomputer über einen Hyperterminal vom PC ein Zeichen an den Tauchcomputer gesendet. Dieser sendete das empfangende Zeichen an den PC zurück. Der Test der Software konnte damit die beidseitige Kommunikation nachweisen.

## 6.2 Überprüfung der Drucksensoren

Wie in Kapitel 4 beschrieben, wurde ein Drucksensor ausgewählt, der vom Hersteller bereits kalibriert ausgeliefert wird. Dieser Sensor liefert laut Herstellerangaben eine Genauigkeit, die in den vorgegebenen Grenzen vom Auftraggeber liegt. Die Kalibrierung und die Temperaturkompensation der Druckmessung erfolgt über eine Korrekturrechnung im Mikrocontroller. Der Hersteller gibt dazu in seinem Datenblatt den notwendigen Programmablauf vor. Dieser ist als Auszug aus dem Datenblatt des Sensors im Anhang zu finden. Eine Untersuchung zur Genauigkeit der Messergebnisse ist somit nicht notwendig. Es bleibt daher nur die Funktion des Programmcodes der Software zu verifizieren.

Um zu kontrollieren, ob der Programmcod richtig in die Software implementiert wurde, ist zunächst der Messwert der angezeigten Temperatur des Sensors zu überprüfen, da über den integrierten Temperatursensor die Temperaturkompensation des Drucksensors realisiert ist. Dazu wurden drei Vergleichsmessungen durchgeführt. Das dafür verwendete Thermometer hat einen Messbereich von 0 bis 100 °C. Für den Messbereich ist eine Genauigkeit von  $\pm 0,3$  °C angegeben. Die Temperaturmessungen erfolgten in unterschiedlich temperiertem Wasser. Die Ergebnisse dieser Vergleichsmessung sind in der Tabelle 7 aufgeführt:

| Wassertemperatur | Temperaturanzeige Vergleichsthermometer | Temperaturanzeige Drucksensor | Messdifferenz |
|------------------|---|-------------------------------|---------------|
| 4,0 °C           | 4,0 °C                                  | 3,7 °C                        | - 0,3 K       |
| 22,5 °C          | 22,5 °C                                 | 22,3 °C                       | - 0,2 K       |
| 38,0 °C          | 38,0 °C                                 | 38,4 °C                       | + 0,4 K       |

**Tabelle 7: Temperaturmessung des Drucksensors**

Über die Vergleichsmessungen konnte nachgewiesen werden, dass die implementierte Software der Temperaturmessung korrekt funktioniert. Die oben festgehaltenen Messdifferenzen liegen alle in den Grenzen der angegebenen Genauigkeit von  $\pm 0,8$  °C des Drucksensors.

Die Überprüfung der eigentlichen Druckmessung fand in einer Druckkammer statt. Hierbei wurde über eine Handpumpe ein Druck im Bereich von 1 bis 9 bar absolut in der Druckkammer erzeugt. Zur Verifizierung der Druckanzeige am Tauchcomputer wurden Manometer genutzt. Diese Überprüfung ergab, dass die implementierte Software in einem Messbereich von 1 bis 9 bar absolut die gewünschte Funktion aufweist. Die Abbildung 35 zeigt die hierfür verwendete Druckkammer.



Abbildung 35: Druckkammer

### 6.3 Experimentelle Überprüfung der Sauerstoffsensoren

Die Messung der Sauerstoffsensoren erfolgte in dem Oberflächen-/Konfigurationsmodus. Um die Messung des Sauerstoffpartialdruckes für unterschiedlich gealterte Sauerstoffsensoren experimentell zu überprüfen, wurde der Sensor über eine einfache Schaltung simuliert. Die nachfolgende Abbildung 36 zeigt diesen Aufbau.

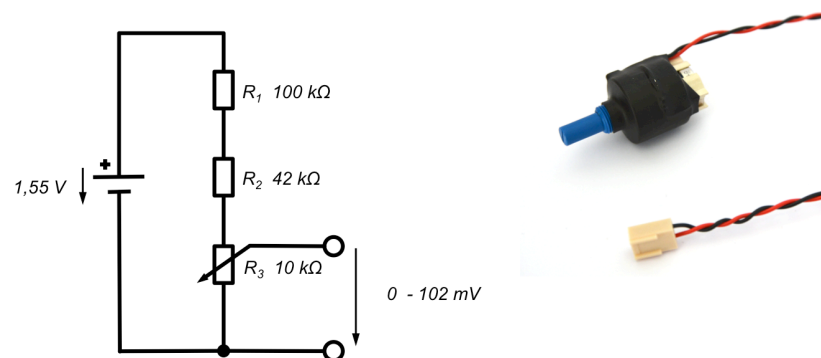
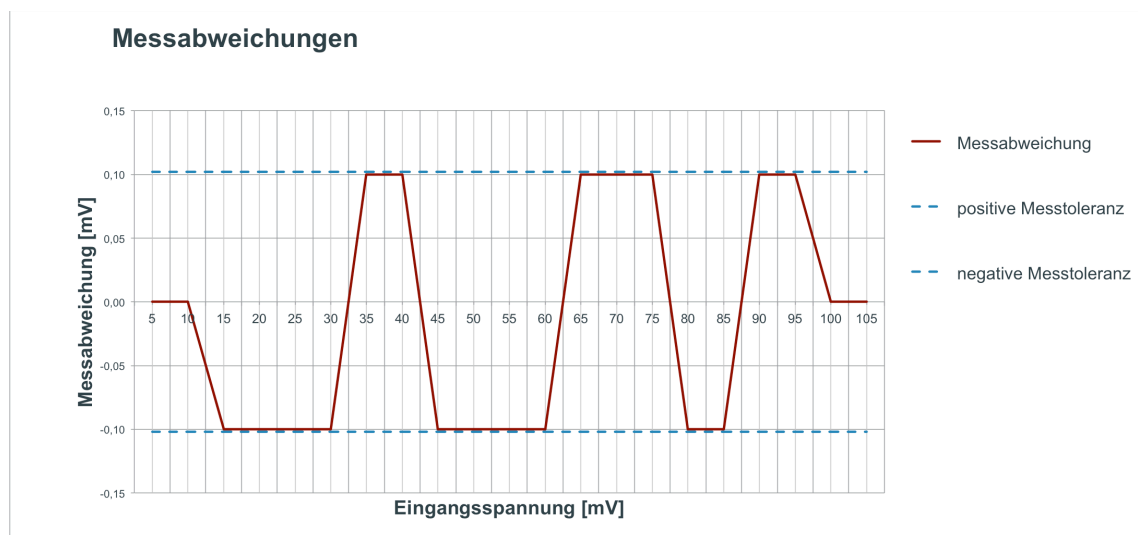


Abbildung 36: Simulation Sauerstoffsensor

Um die Abweichungen der Messung zu überprüfen, wurde der Spannungsteiler auf die entsprechende Ausgangsspannung des jeweiligen Sensors eingestellt, den dieser in einer Umgebung mit reinem Sauerstoff ausgeben würde. Die Messung wurde auf die Ausgangsspannung kalibriert.

Die Aufnahme der Messwerte zur Bestimmung der Messabweichung erfolgte in Messabständen von 0,05 bar. Es konnten bei allen drei simulierten Sensoren keine Messabweichungen festgestellt werden.

Eine Aufnahme der Messabweichung für den gesamten Eingangsmessbereich der Schaltung von 0 bis 105 mV hat darüber hinaus ergeben, dass auch der angezeigte Messwert der Sensorspannung keine nennenswerten Abweichungen erkennen ließ. Bestimmt wird die festgestellte Abweichung allein durch die Auflösung der Anzeige und durch Rundungsfehler. Sie betrug  $\pm 0,10$  mV. Das Ergebnis dieser Überprüfung zeigt die folgende Abbildung 37. Die Aufnahme der Messwerte erfolgte dabei in Schritten von 5 mV. Damit stellt die Messung der Sauerstoffsensoren ein hoch präzises und sehr gutes Messergebnis dar, da sowohl die Signalaufbereitung als auch der A/D-Wandler des Mikrocontrollers sehr genau arbeiten.



**Abbildung 37: Messabweichungen durch Auflösungsfehler**

Die oben durchgeführte Untersuchung zur Messabweichung ging von einer linearen Kennlinie des Sensors aus. Der Hersteller des Sensors gibt in seinem Datenblatt nur das Verhalten des Sensors in einem Bereich von 0 bis 100 Sauerstoff Vol. % unter atmosphärischen Druck an. Diese Angabe entspricht einem Sauerstoffpartialdruck von 0 bis 1 bar. Für diesen Bereich beträgt die Abweichung laut Hersteller  $< 1\%$  und ist damit für diesen Bereich linear.

Der Messbereich des Sensors ist laut Aufgabenstellung aber mit 0,21 bis 1,65 bar definiert. Die oben durchgeführte Untersuchung beruht auf einem linearen Verhalten des Sensors über den gesamten Messbereich. Um die Untersuchung auf ihre Richtigkeit zu überprüfen, wurde ein galvanischer Sauerstoffsensor mit dem Drucksensor in der Druckkammer platziert. Über eine Druckänderung erfolgt zugleich die Änderung des Sauerstoffpartialdruckes. Damit kann die Kennlinie des Sensors über den vorgegebenen Messbereich aufgenommen werden. Die Abbildung 38 zeigt die Kennlinie des Sensors im Bereich

von 0,21 bis 1,65 bar. Das Ausgangssignal des Sensors wies ein lineares Verhalten auf. Somit konnte die oben durchgeführte Untersuchung zur Messabweichung anhand der Kennlinie eines realen Sensors verifiziert werden.

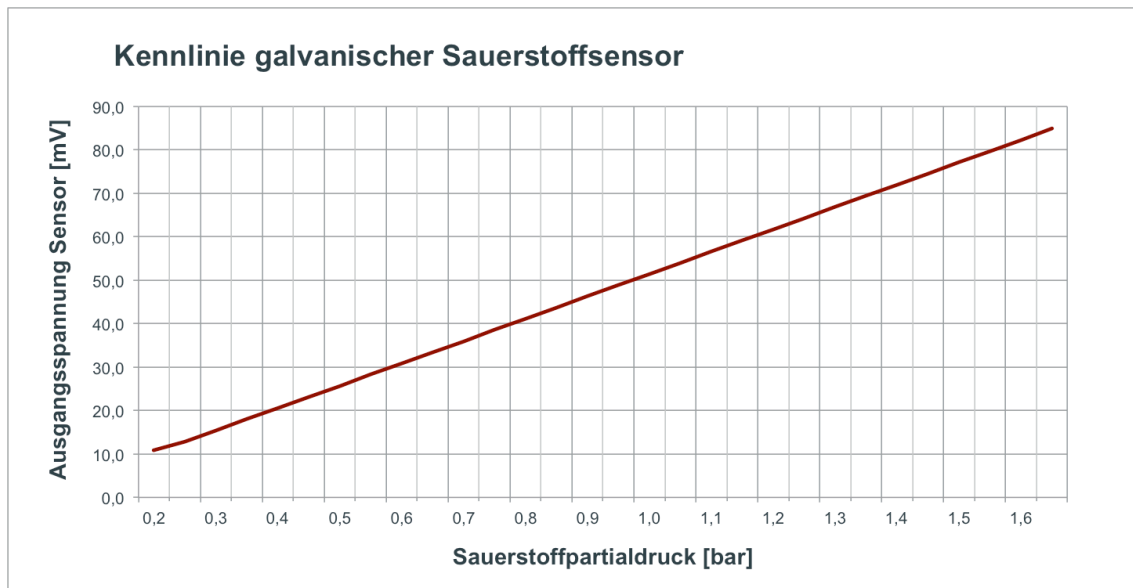


Abbildung 38: Kennlinie galvanischer Sauerstoffsensor

## 6.4 Messungen zum Energieverbrauch der Schaltung

### 6.4.1 Messungen zur Stromaufnahme im Betrieb

Um den Energieverbrauch der Schaltung im Betrieb zu ermitteln, wurde der Tauchcomputer über ein Labornetzteil versorgt. Dabei wurden der Strom und die Spannung gemessen. Die Messungen wurden hierbei sowohl im Oberflächenmodus als auch im Tauchmodus durchgeführt. Das folgende Diagramm (Abbildung 39) gibt die Leistungsaufnahme des Tauchcomputers in Abhängigkeit der Eingangsspannung wieder. Es ist zu sehen, dass die Leistungsaufnahme unabhängig von der Eingangsspannung konstant ist. Die vorgegebene Eingangsspannung entspricht dem Betriebsspannungsbereich eines Li-Ion-Akkumulators.

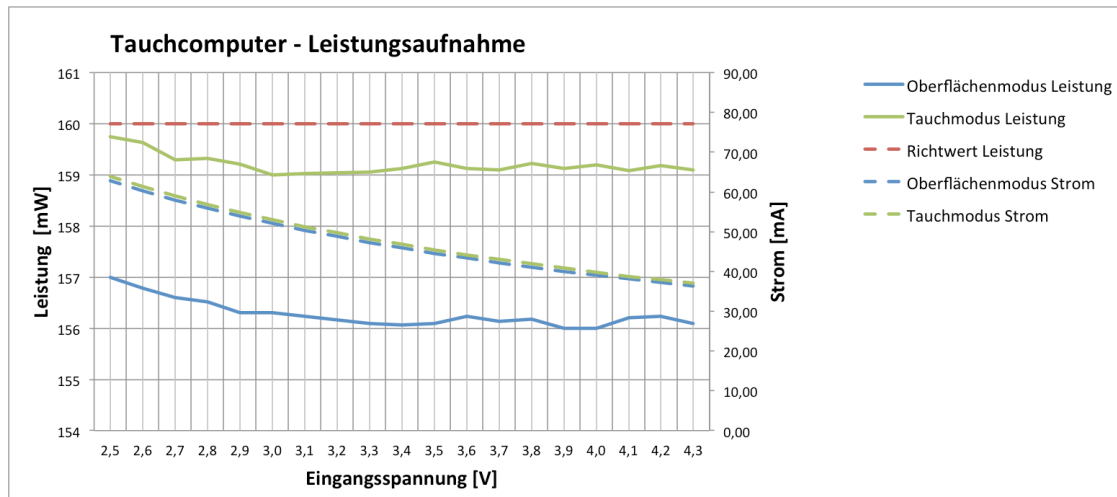


Abbildung 39: Leistungsaufnahme des Tauchcomputer

Die Leistungsaufnahme des Tauchcomputers liegt im Tauchmodus bei ca. 159 mW. Im Oberflächenmodus weist er eine Leistungsaufnahme von ca. 156,5 mW auf. Damit wurde der in Kapitel 4 gesetzte Richtwert zur Leistungsaufnahme von 160 mW eingehalten. Bei Versorgung des Tauchcomputers über den vorgesehen Li-Ion-Akkumulator mit einer Kapazität von 1450 mAh kann damit rechnerisch eine Laufzeit von ca. 33 Stunden erzielt werden. Folglich konnte die geforderte Laufzeit von 20 Stunden erfüllt werden. Zudem hat ein durchgeführter Langzeittest die Laufzeit von 20 Stunden nachweisen können. Bei diesem konnte eine Laufzeit von über 32 Stunden erzielt werden.

#### 6.4.2 Messungen zur Ruhestromaufnahme und Tiefentladeschutz

In der entwickelten Software ist ein Tiefentladeschutz implementiert, der kontinuierlich die Spannung des Akkumulators misst. Sinkt die Spannung unterhalb von 3,05 V, so schaltet der Mikrocontroller die extern angeschlossene Peripherie in den Standby-Modus. Dazu zählen die Drucksensoren sowie das Display. Ferner wird auch die Spannungsversorgung für das Display abgeschaltet. Nachdem die Komponenten in dem Standby-Modus geschaltet wurden, wird der Mikrocontroller selbst in den Power-down-Modus versetzt. Hierbei schaltet der Mikrocontroller einen Großteil der integrierten Peripherie und seinen Systemtakt ab. Dies führt dazu, dass die Stromaufnahme des Mikrocontrollers auf 100 nA absinkt. Die folgende Abbildung 40 aus dem Datenblatt des Mikrocontrollers veranschaulicht dies.



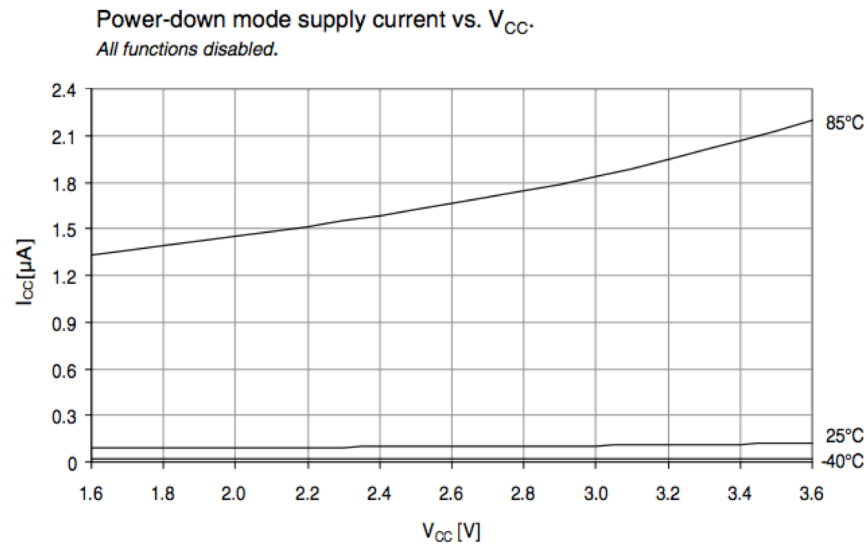


Abbildung 40: Stromaufnahme - Power-down mode <sup>51</sup>

Messungen der Stromaufnahme im Power-down Modus ergaben, dass der Tauchcomputer trotz Abschalten aller Komponenten eine Stromaufnahme von 2,1 mA aufwies. Die Untersuchung zeigte, dass die positive Spannungsversorgung des OLED-Displays von 4,6 V nicht wie geplant abschaltet. An den Ausgangskondensatoren des Step-up-Reglers bleibt im abgeschalteten Zustand die Batteriespannung abzüglich des Spannungsabfalls der Diode bestehen. Die folgende Abbildung 41 zeigt diesen Zusammenhang.

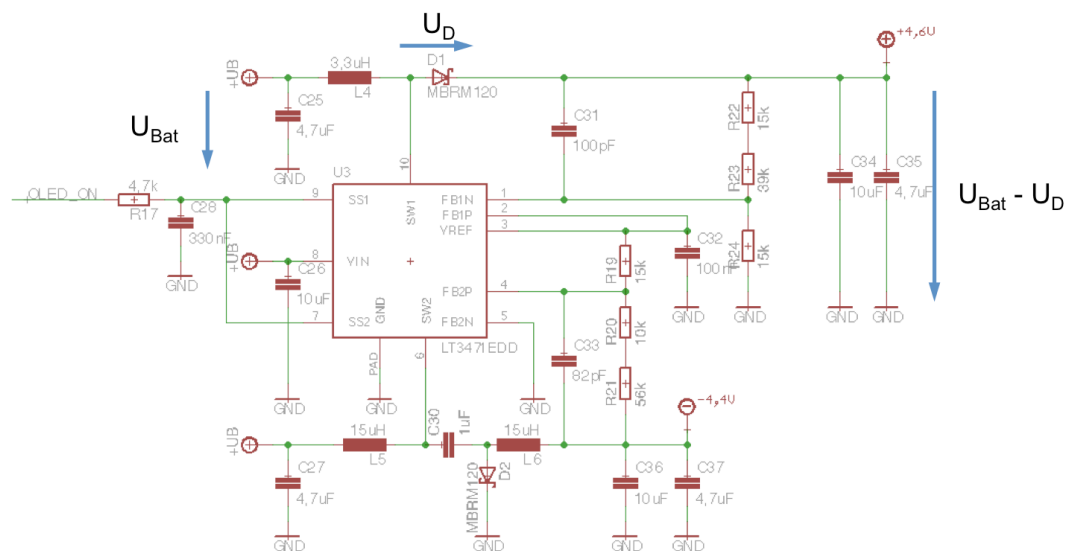
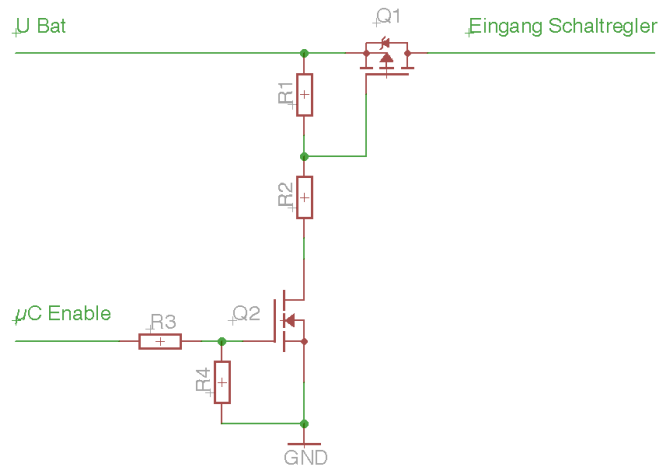


Abbildung 41: Ausgangsspannung des Schaltregler nach Abschaltung

<sup>51</sup> [17] Atmel (2013), Datasheet XMEGA A3, Seite 79.

Die Stromaufnahme von 2,1 mA wird vom OLED-Display hervorgerufen. Untersuchungen ergaben, dass sich die Stromaufnahme auf kaum messbare 100  $\mu$ A absenken lässt, wenn die Versorgungsspannung von 4,6 V ganz abschaltet. Dies kann durch das Installieren einer Abschaltung erreicht werden. Die Abbildung 42 zeigt die Schaltung, die in den Tauchcomputer zu integrieren ist, um die Stromaufnahme auf 100  $\mu$ A abzusenken.



**Abbildung 42: Abschaltung Schaltregler**

Ein Ruhestrom von ca. 100  $\mu$ A stellt einen sehr guten Wert dar, sodass damit der geforderte Tiefentladeschutz über den Tauchcomputer, wie in dem Systemkonzept vorgesehen wurde, realisiert werden kann.

## 7 Ergebnisse und Ausblick

Dieses abschließende Kapitel fasst die Arbeit und die Ergebnisse des Projekts zusammen. Es umfasst eine Bewertung der Ergebnisse dieser Arbeit anhand der gestellten Rahmenbedingungen, die im Kapitel 3 aufgelistet wurden. Der Ausblick zeigt zudem weitere geplante Funktionen auf, die in den bisherigen Softwarestand des Tauchcomputers integriert werden sollen. Darüber hinaus werden weitere Einsatzmöglichkeiten für die entwickelte Plattform des Tauchcomputers dargestellt.

### 7.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Arbeit begann im Kapitel 2 mit einer Marktanalyse zu auf dem Markt erhältlichen Tauchcomputern. Anhand der von den Herstellern veröffentlichten technischen Daten wurden diese gegenüberstellend im Hinblick auf ihre Funktionalität und der eingesetzten Hardware betrachtet.

Die Grundlagen zeigten die Funktion und die wesentlichen Eigenschaften von Drucksensoren, galvanischen Sauerstoffsensoren, Akkumulatoren als auch von Displays auf. Dieses Kapitel bildete damit den Ausgangspunkt für die Aufstellung des Systemkonzeptes im Kapitel 4. Hier wurde zunächst die Auswahl der Bauteile aufgezeigt. Diese geschah unter Berücksichtigung der für dieses Projekt wichtigen Aspekte, wie Genauigkeit der Messungen sowie dem Leistungs- und Platzbedarf der eingesetzten Komponenten. Eine in einem nächsten Schritt durchgeführte Untersuchung zum Leistungsbedarf der Komponenten konnte die Realisierbarkeit belegen. Zugleich bildete diese die Grundlage zur Auswahl eines geeigneten Akkumulators. Abschließend wurde das Systemkonzept grafisch in einem Blockschaltplan festgehalten.

Ausgehend vom Systemkonzept befasste sich das Kapitel 5 mit der Umsetzung der Spannungsversorgung des Tauchcomputers. Weiterführend wurde die Ladeschaltung für den Li-Ion-Akkumulator dargestellt. Darüber hinaus zeigte das Kapitel die Realisierung der Messschaltung für die Sauerstoffsensoren auf. Es wurden im Wesentlichen die Umsetzung der Signalanpassung und der Signalfilterung dargelegt, welche Voraussetzung für ein präzises Messergebnis ist.

Im vorangegangenen Kapitel 6 „Systemtest“ konnte nachgewiesen werden, dass die gestellten Anforderungen vom Auftraggeber an das Projekt, welche im Kapitel 3 ausführlich beschrieben wurden, weitestgehend erfüllt werden konnten.

Um einen Systemtest des Tauchcomputers durchführen zu können, wurde ein Betriebssystem für den Tauchcomputer entwickelt. Anhand dieses Systemtests konnten die gestellten Anforderungen des Auftraggebers an das Projekt überprüft und belegt werden.

Das Betriebssystem umfasst einen Oberflächenmodus und einen Tauchmodus. Der Oberflächenmodus ermöglicht zum einen das Einstellen von Datum und Uhrzeit und zum anderen das Kalibrieren der drei Sauerstoffsensoren. Er zeigt dazu die Messdaten der Sensoren anhand der Messspannung und dem zugehörigen Sauerstoffpartialdruck auf dem Display an. Darüber hinaus bietet er sowohl eine Anzeige über den Ladestatus des Akkumulators als auch die Anzeige der Temperatur und des Umgebungsdruckes.

Über die Druckmessung erfolgt ein automatisches Umschalten in den Tauchmodus. Hier werden die für den Taucher wichtigen Daten während des Tauchganges angezeigt. Neben der aktuellen Tauchtiefe, der maximalen Tauchtiefe und der Tauchzeit wird auch die Wassertemperatur angezeigt. Zudem wird der Sauerstoffpartialdruck der drei Sauerstoffsensoren auf dem Display ausgegeben.

Der Systemtest hat des Weiteren nachgewiesen, dass der Tauchcomputer die gewünschte Kommunikation mit dem PC über die USB-Schnittstelle realisieren kann. Die Kommunikation, die ein Konfigurieren und das Auslesen der Tauchdaten ermöglichen soll, ist in den bisherigen Softwarestand allerdings noch nicht integriert.

Über die USB-Schnittstelle kann der Li-Ion-Akkumulator geladen werden. Der Ladestatus wird dabei sowohl über das OLED-Display als auch über eine LED am Tauchcomputer angezeigt.

Der derzeitige Stand der Entwicklung realisiert noch keinen Tiefentladeschutz des Akkumulators über den Tauchcomputer. Versuche zu der im Kapitel 6 dargestellten Abschaltung der Spannungsversorgung haben jedoch ergeben, dass ein Tiefentladeschutz über den Tauchcomputer möglich ist. Dies bedarf lediglich der Integration einer Abschaltung der Spannungsversorgung des OLED-Displays.

Ferner konnte die vom Auftraggeber geforderte Laufzeit über die Messung der Leistungsaufnahme im Tauch- sowie im Oberflächenmodus nachgewiesen werden. Der eingesetzte Li-Ion-Akkumulator mit einer Kapazität von 1450 mAh würde rechnerisch eine Laufzeit von über 33 Stunden realisieren können. Überdies konnte der durchgeführte Langzeittest den geforderten 20-stündigen Betrieb des Tauchcomputers belegen. Es wurde in diesem Test eine Laufzeit von über 32 Stunden erzielt.

Darüber hinaus konnte durch die Auswahl vom Hersteller kalibrierter Drucksensoren die geforderte Genauigkeit für die Einsatztiefe von 180 m garantiert werden. Die Temperaturkompensation der Druckmessung ist softwarebasierend. Ein Nachweis für die korrekte Funktion von Temperatur-, als auch Druckmessung wurde experimentell erbracht.

Die Überprüfung der Messung der galvanischen Sauerstoffsensoren ergab, dass diese hoch genau arbeitet, da keine Messabweichungen festgestellt werden konnten. Dabei wurden über eine Schaltung unterschiedlich gealterte Sauerstoffsensoren simuliert. Die Messung wurde anhand eines realen Sensors verifiziert.

Die vorgegebene Größe der Platine wurde eingehalten. Diese besitzt die Abmaße von 43 x 60 mm. Somit kann die entwickelte Schaltung nach Integration in ein Gehäuse vom Auftraggeber unter realen Bedingungen getestet werden.

Die Materialkosten für den Tauchcomputer beliefen sich auf ca. 140 €. Mit zusätzlich 57 € stellten die ausgewählten Drucksensoren bei der Realisierung den größten Kostenfaktor dar. Damit kann der entwickelte Tauchcomputer mit den in Kapitel 2 vorgestellten Tauchcomputern unter dem Aspekt der Kosten durchaus mithalten.

Durch die Offenlegung der Schaltpläne und des bisher entwickelten Programmcodes bietet der entwickelte Tauchcomputer freie Gestaltungsmöglichkeiten. So können weiterführende Funktionen in den Tauchcomputer implementiert werden. Im nachfolgenden Ausblick werden einige dieser Gestaltungsmöglichkeiten aufgezeigt.

## 7.2 Ausblick

Der Tauchcomputer stellt, wie vorangegangen beschrieben, eine funktionstüchtige Plattform dar, die Möglichkeiten für weitere Entwicklungen zulässt. So kann diese nach einer vorgesehenen Revision der Schaltung auch den Tiefentladeschutz realisieren. Die Konstruktion und Fertigung eines Gehäuses für den Tauchcomputer durch den Auftraggeber des Projekts ist Voraussetzung für die Erstinbetriebnahme unter realen Bedingungen.

Es ist geplant in den Tauchcomputer eine Funktion zur Überwachung von Grenzwerten zu integrieren. Die Funktion soll den Taucher bei Über- bzw. Unterschreiten von zuvor definierten Grenzwerten warnen. Die Anzeige der Grenzwertüberschreitungen kann nach Belieben sowohl farbig als auch blinkend auf dem Display ausgegeben werden. Die Konfiguration der Grenzwerte wird dabei in die Menüstruktur eingearbeitet. Wichtige Grenzwerte stellen beispielsweise Überschreitungen beim Sauerstoffpartialdruck oder auch das Unterschreiten einer definierten Batteriespannung dar.

Eine Plausibilitätsüberprüfung der Drucksensoren bzw. der Sauerstoffmessung ist ebenfalls noch in die Software zu implementieren, damit beim Ausfall eines Sensors eine korrekte Anzeige der Messwerte auf dem Display gewährleistet ist.

Es ist weiterführend geplant eine Dekompressionssteuerung zur Nutzung von verschiedenen Atemgasen in den Tauchcomputer zu integrieren. Die Konfiguration des Atemgases wird dabei in die Menüstruktur des Tauchcomputers eingearbeitet.

Die integrierte USB-Schnittstelle befähigt den Tauchcomputer gespeicherte Daten von durchgeführten Tauchgängen an den PC zu übertragen, sodass eine grafische Auswertung der Tauchgänge am PC ermöglicht wird. Die vom Auftraggeber gewünschte und implementierte Mikro-SD-Karte kann dabei als Speicher dienen.

Die Plattform stellt zudem eine Basis für weitere folgende Projekte dar. So ist zum einen ein Einsatz der entwickelten Platine für ein Messgerät zur Analyse von Atemgasen für Taucher geplant. In einem anderen Projekt ist ferner vorgesehen, den Tauchcomputer zur Regelung des Sauerstoffpartialdruckes in Kreislauftauchgeräten einzusetzen.

## Literatur

- [1] Heinrichs und Weikamp: *OSTC 3 und DR5*,  
<http://www.heinrichsweikamp.com>,  
verfügbar am: 15.06.2013 10:00.
  
- [2] Shearwater Research Inc.: *Petrel OC/CC EXT und Predator OC/CC EXT*,  
<http://www.shearwaterresearch.com/products>,  
verfügbar am: 15.06.2013 10:00.
  
- [3] Gaßmann, E. & Gries, A.: *Elektronische Druckmesstechnik*,  
München, Süddeutscher Verlag onpact GmbH, 2009.
  
- [4] PTB, *Die Gesetzlichen Einheiten in Deutschland*,  
[http://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/publikationen/Einheiten\\_deutsch.pdf](http://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/publikationen/Einheiten_deutsch.pdf), verfügbar am: 10.07.2013 12:00.
  
- [5] Tietze, U. & Schenk, Ch.: *Halbleiter-Schaltungstechnik*  
(11. Auflage), Berlin, Springer Verlag, 1999.
  
- [6] Muth, C.-M. & Radermacher, P.: *Kompendium der Tauchmedizin*  
(2. Auflage), Köln, Deutscher Ärzte Verlag, 2006.
  
- [7] Drägerwerk AG und Co. KGaA: *O<sub>2</sub>-Sensoren*,  
[http://www.draeger.net/media/10/01/75/10017598/accessories\\_o2\\_sensor\\_9049118\\_de.pdf](http://www.draeger.net/media/10/01/75/10017598/accessories_o2_sensor_9049118_de.pdf), verfügbar am 20.06.2013 10:00.

- [8] EnviteC: *Datasheet Sauerstoffsensor OOD101*,  
[http://www.envitec.com/produkte/sortiment/tauchen/sauerstoffsensor\\_ood101\\_ART\\_\\_01-00-0088.html](http://www.envitec.com/produkte/sortiment/tauchen/sauerstoffsensor_ood101_ART__01-00-0088.html),  
verfügbar am: 24.06.2013 09:00.
- [9] Panasonic: *Ni-MH Handbook*,  
<http://industrial.panasonic.com/eu/i/21291/Handbook2011/Handbook2011.pdf>, verfügbar am: 23.06.2013 15:00.
- [10] VATRA: *Sales program and technical handbook*,  
[http://www.elektronik.ropla.eu/pl/dystrybucje/varta/HANDBOOK\\_Rechargeable\\_Lithium\\_VARTA\\_PoLiFlex\\_en.pdf](http://www.elektronik.ropla.eu/pl/dystrybucje/varta/HANDBOOK_Rechargeable_Lithium_VARTA_PoLiFlex_en.pdf),  
verfügbar am: 24.06.2013 19:00.
- [11] Panasonic: *Datasheet Li-Ionen UR14500P*,  
<http://industrial.panasonic.com/www-data/pdf2/ACA4000/ACA4000CE278.pdf>, verfügbar am: 24.06.2013 21:00.
- [12] Merck KGaA: *Flüssigkristalle - LCD Technologie*,  
[http://www.merck-performance-materials.com/de/display/function\\_of\\_lcd\\_technologies/function\\_of\\_lcd\\_technologies.html](http://www.merck-performance-materials.com/de/display/function_of_lcd_technologies/function_of_lcd_technologies.html),  
verfügbar am: 25.06.2013 12:00.
- [13] Merck KGaA: *OLEDs - Aufbau und Funktionsprinzip*,  
[http://www.merck-performance-materials.com/de/display/function\\_of\\_lcd\\_technologies/oled/oled.html](http://www.merck-performance-materials.com/de/display/function_of_lcd_technologies/oled/oled.html),  
verfügbar am: 25.06.2013 12:00.
- [14] Lovaled: *OLEDs*,  
[http://www.novaled.com/novaled/doping\\_technology\\_for\\_oled](http://www.novaled.com/novaled/doping_technology_for_oled),  
verfügbar am: 30.06.2013 10:00.



- [15] Voigt, C.: *Aktiv-Matrix OLEDs*, Elektronik Industrie, Ausgabe 6-2008,  
<http://www.all-electronics.de/media/file/4476>,  
verfügbar am: 30.06.2013 10:00.
- [16] Measurement Specialties: *Datasheet MS5803-30BA Miniature 30 bar Module*,  
<http://www.meas-spec.com/downloads/MS5803-30BA.pdf>,  
verfügbar am: 01.07.2013 10:00.
- [17] Atmel: *Datasheet 8/16-bit AVR XMEGA Microcontroller*,  
[http://www.atmel.com/Images/Atmel-8068-8-and16-bit-AVR-XMEGA-A3-Microcontrollers\\_Datasheet.pdf](http://www.atmel.com/Images/Atmel-8068-8-and16-bit-AVR-XMEGA-A3-Microcontrollers_Datasheet.pdf),  
verfügbar am: 01.07.2013 10:00.
- [18] Densitron Displays: *Datasheet OLED-Display C0240QGLA-T*,  
<http://www.farnell.com/datasheets/44138.pdf>,  
verfügbar am: 01.07.2013 10:00.
- [19] Displaytech Ltd: *Datasheet LCD Module INT024BTFT*,  
<http://docs-europe.electrocomponents.com/webdocs/1057/0900766b810573d1.pdf>, verfügbar am: 01.07.2013 10:00.
- [20] Saft - Specialty Battery Group: *Primary lithium battery LS14500*,  
[http://www.saftbatteries.com/force\\_download/LS14500.pdf](http://www.saftbatteries.com/force_download/LS14500.pdf),  
verfügbar am: 01.07.2013 10:00.
- [21] Panasonic: *Datasheet Li-Ionen UR18500H*,  
<http://www.panasonic.com/industrial/includes/pdf/ACA4000CE281-UR18500H.pdf>, verfügbar am: 01.07.2013 10:00.
- [22] Linear Technology: *Datasheet LTC3440*,  
<http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/3440fb.pdf>,  
verfügbar am: 01.07.2013 10:00.

- 
- [23] Linear Technology: *Datasheet LTC4054-4.2*,  
<http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/405442xf.pdf>,  
verfügbar am: 01.07.2013 10:00.
- [24] Universität Kiel: *Elektronische Filter*,  
<http://uksph-s5.physik.uni-kiel.de/edu/praktika/aprakt/teil-2/filter.pdf>, verfügbar am: 01.07.2013 10:00.
- [25] CadSoft: *EAGLE PCB Design Software*,  
<http://www.cadsoftusa.com>, verfügbar am: 01.07.2013 10:00.
- [26] Maxim Integrated Products: *Datasheet DS1339 I<sup>2</sup>C Serial Real Time Clock*,  
<http://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS1339-DS1339U.pdf>, verfügbar am: 01.07.2013 10:00.

## Anlagen

|  |        |
|--|--------|
| Teil 1, Datenblatt Sauerstoffsensor OOD101 ..... | A-I    |
| Teil 2, Programmablauf Drucksensor .....         | A-III  |
| Teil 3, Schaltplan Tauchcomputer .....           | A-V    |
| Teil 4, Schaltplan O2-Sensor Board .....         | A-VII  |
| Teil 5, Layout O2-Sensor Board .....             | A-IX   |
| Teil 6, Layouts Sensorboard .....                | A-XI   |
| Teil 7, CD .....                                 | A-XIII |



# Anlagen, Datenblatt Sauerstoffsensor

## Product Specification

### Oxygen Sensor OOD101 / OOD101-1

**ENVITEC**  
by Honeywell

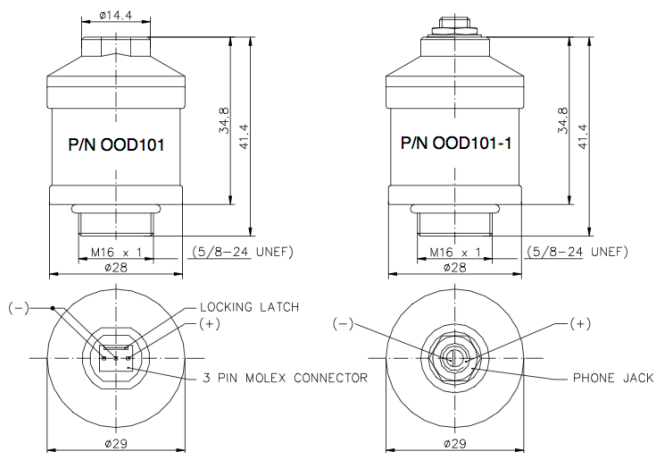
|   |   |
|---|---|
| <b>Measurement Range:</b>                                 | 0-100 % oxygen  |
| <b>Output in ambient air:</b>                             | 7 to 13mV   |
| <b>Electrical Interface:</b>                              | OOD101: 3pin (Molex 22-11-1031)<br>OOD101-1: 3,5mm Mono Jack  |
| <b>Accuracy and Repeatability:</b>                        | < 1 % vol. O <sub>2</sub> when calibrated at 100 % Oxygen   |
| <b>Linearity error:</b>                                   | < 3 % relative  |
| <b>Response time:</b>                                     | < 5sec. to 90 % of final value  |
| <b>Zero Offset Voltage:</b>                               | < 40 µV in 100 % nitrogen   |
| <b>Cross Interference:</b>                                | < 0.1 % vol. O <sub>2</sub> response to:<br>15 % CO <sub>2</sub> balance N <sub>2</sub><br>10 % CO balance N <sub>2</sub><br>- 0.03 % rel. per % RH at 25°C |
| <b>Influence of Humidity:</b>                             | proportional to change in oxygen partial pressure   |
| <b>Influence of Pressure:</b>                             | < 1% relative after a fall from 1m  |
| <b>Influence of Mechanical Shock:</b>                     | 0 to 50°C   |
| <b>Operating Temperature:</b>                             | built-in NTC compensation   |
| <b>Temperature Compensation:</b>                          | between +25 °C and +40 °C: 3 % relative error<br>between 0 °C and +50 °C: 8 % relative error  |
| <b>Effect of Temperature Compensation (steady state):</b> | 0-99 % RH non-condensing  |
| <b>Operating Humidity:</b>                                | < 1 % vol oxygen per month<br>typically < - 15 % relative over lifetime   |
| <b>Long Term Output Drift:</b>                            | -20 to +50 °C<br>+5 to +15 °C<br>≥ 10 kOhms<br>< 30 minutes, after replacement of sensor  |
| <b>Storage Temperature:</b>                               | ≥ 500 000 % vol oxygen hours  |
| <b>Recommended Storage:</b>                               | approximately 28 grams  |
| <b>Recommended Load:</b>                                  | Less than 3 months  |
| <b>Warm-Up Time:</b>                                      | 12 months   |
| <b>Nominal Sensor Lifetime:</b>                           | 01-00-0088 / OOD101   |
| <b>Weight:</b>  | 01-00-0071 / OOD101-1   |
| <b>Shelf Life:</b>  |   |
| <b>Warranty Period:</b>                                   |   |
| <b>Part No.:</b>  |   |

#### Use the advantages:

- Designed and manufactured according to EN ISO 9001 : 2000
- Accurate and reliable response
- Excellent signal stability
- High product quality
- Short lead times
- Technical support



All specifications are applicable at standard conditions: 1013 hPa, 25°C dry ambient air



Dimension in mm

**ENVITEC-WISMAR GMBH**

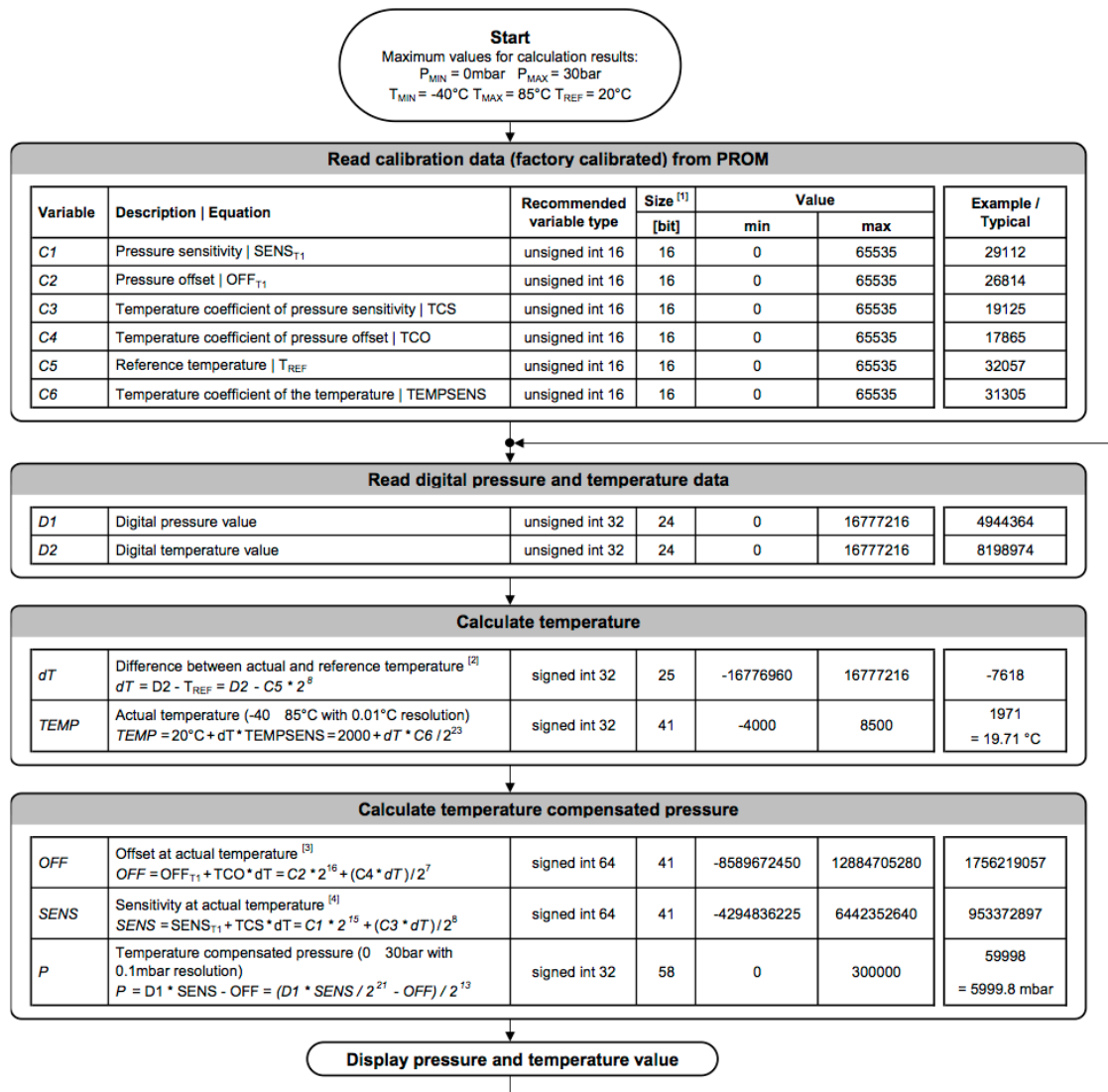
Alter Holzhafen 18  
D-23966 Wismar

Phone: +49-(0) 3841- 360 1  
Fax: +49-(0) 3841- 360 222  
E-Mail: [info@envitec.com](mailto:info@envitec.com)  
<http://www.envitec.com>



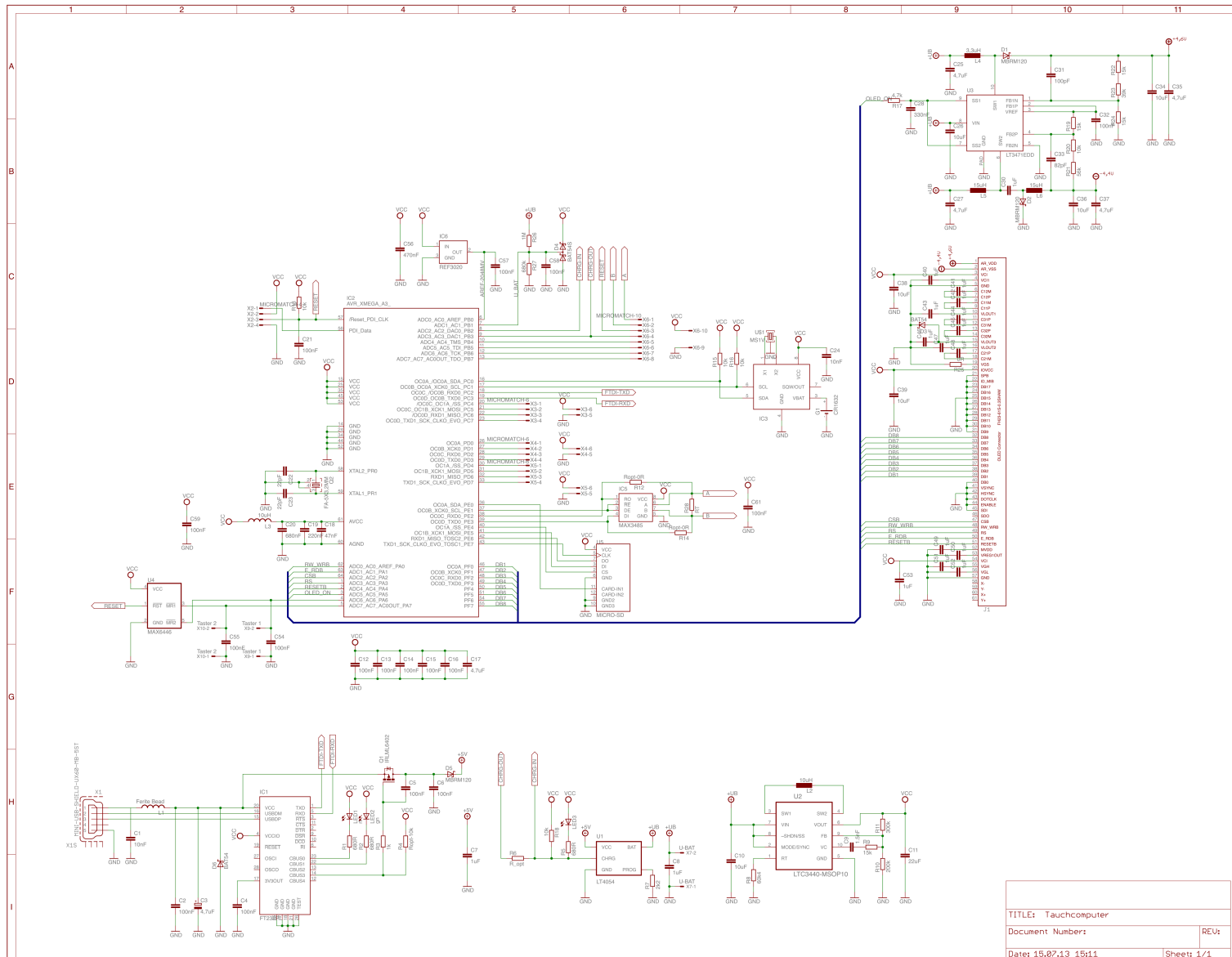
# Anlagen, Programmablauf Drucksensor

## PRESSURE AND TEMPERATURE CALCULATION



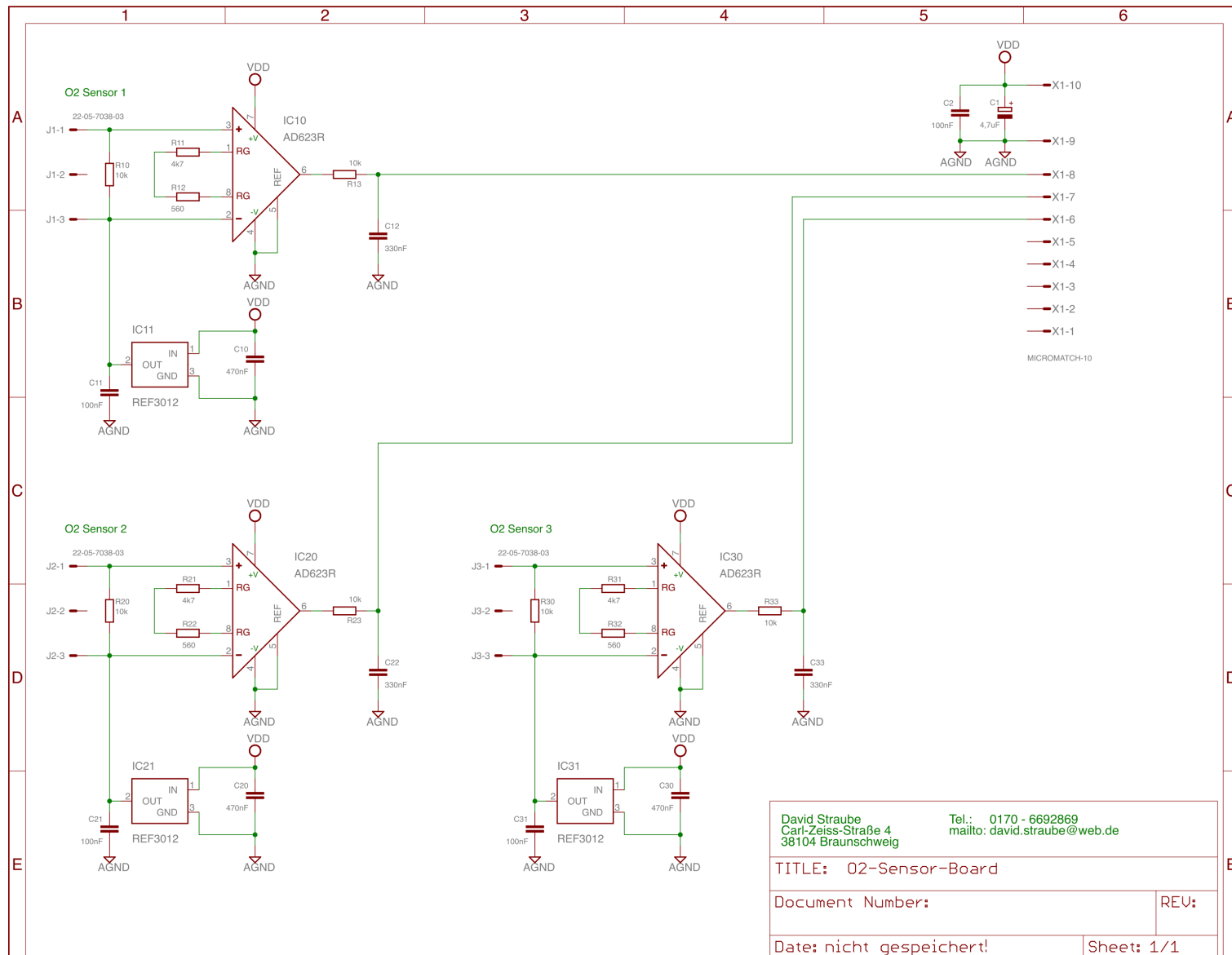






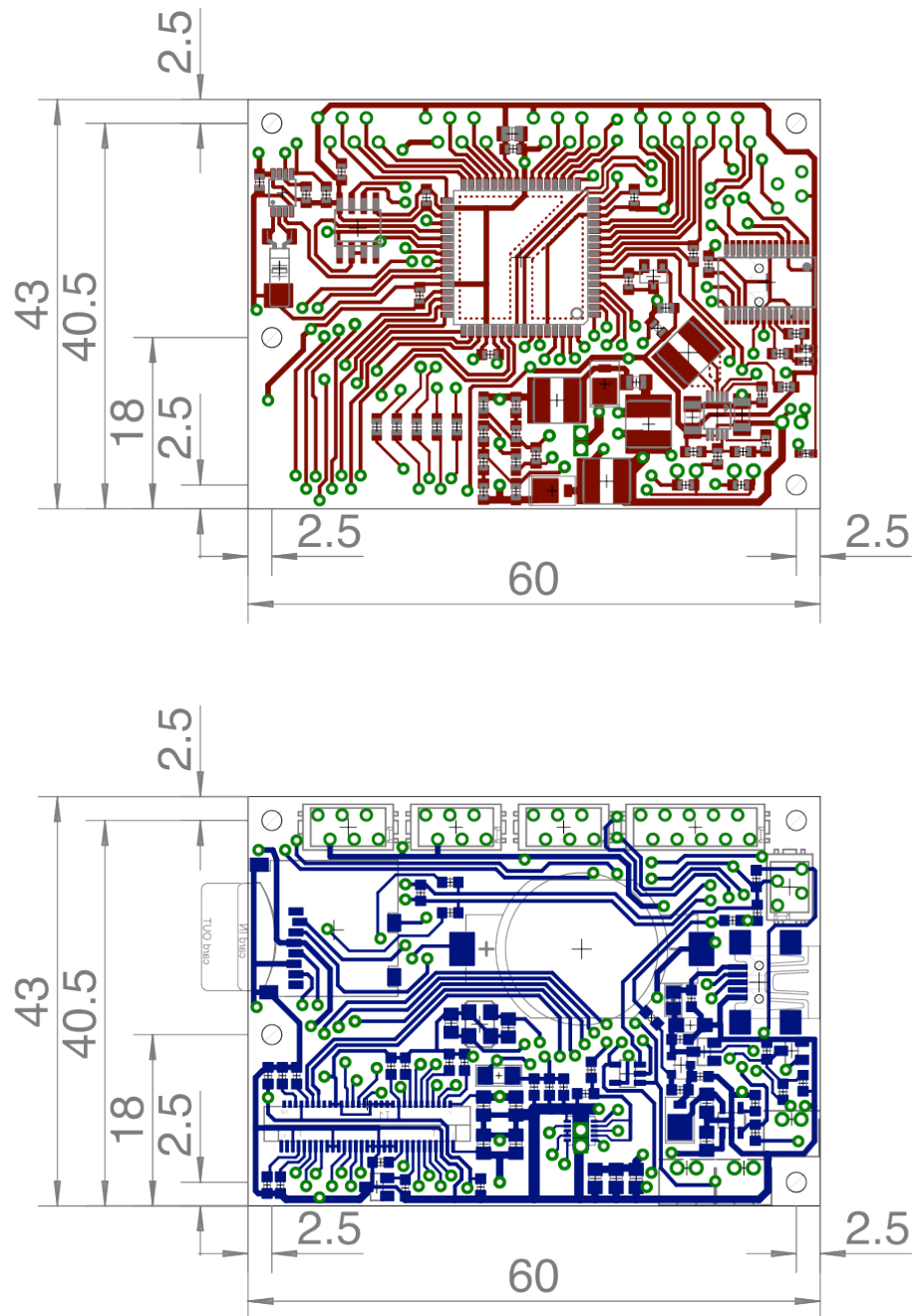


## Anlagen, Schaltplan O2-Sensor-Board



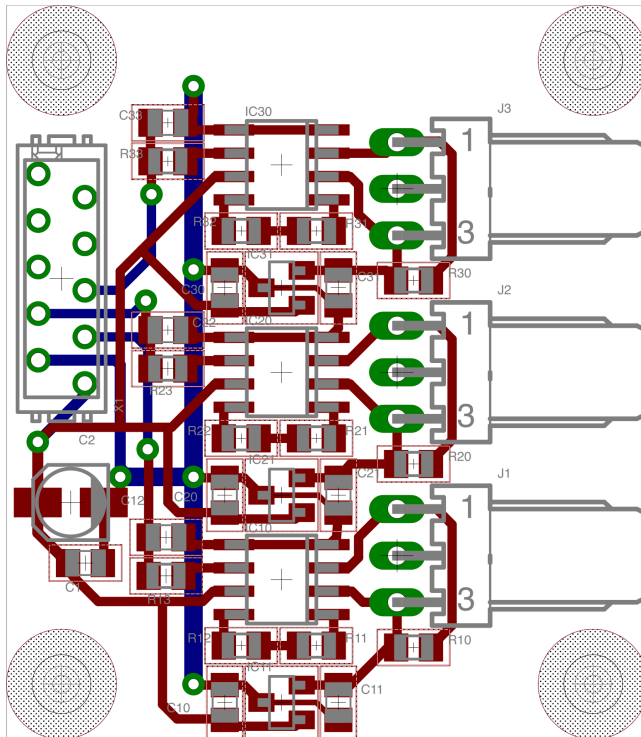


## Anlagen, Layout Tauchcomputer

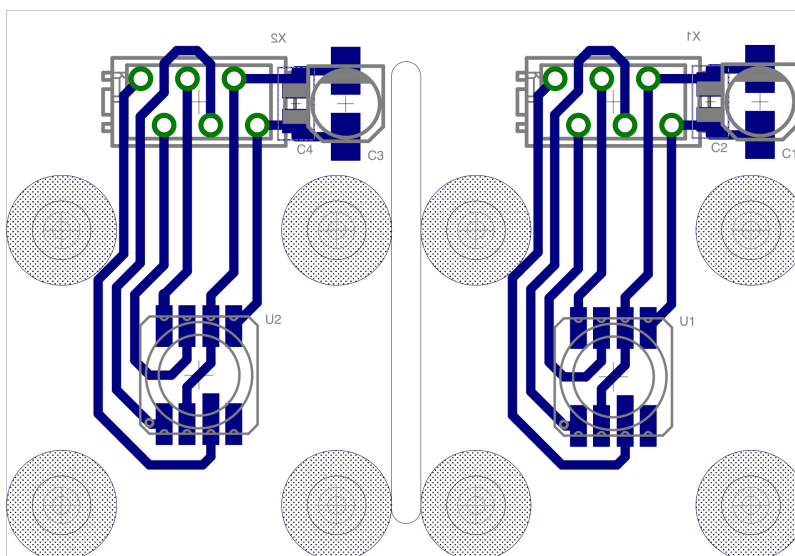




## Anlagen, Layouts Sensorboards



O<sub>2</sub>-Sensor-Board



Pressure-Sensor-Board





## **Anlagen, CD**



## **Selbstständigkeitserklärung**

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Diese Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Braunschweig, den 17.07.2013

David Straube